

CAPITULO 1

CONCEPTOS BASICOS SOBRE PUESTA A TIERRA

Desde un punto de vista físico o constructivo, se puede definir una puesta a tierra o instalación de tierra como un conjunto de elementos metálicos que proporcionan un contacto eléctrico conductivo entre el medio en que se encuentran inmersos (terreno, en general) e instalaciones, equipos, estructuras metálicas, etc., instaladas fuera de ese medio. Esta unión conductiva se realiza con el propósito de satisfacer ciertos objetivos que son en último término los que definen conceptual y funcionalmente una puesta a tierra.

1.1. Objetivos de una puesta a tierra

Los objetivos perseguidos al realizar una puesta a tierra son múltiples y obedecen a razones y situaciones diversas. En algunos casos deberá cumplirse sólo con un objetivo principal. En otros casos, varios objetivos conjuntamente determinarán el dimensionamiento y requisitos de la puesta a tierra.

El potencial del suelo experimenta variaciones debidas a la circulación de corrientes por el terreno, provenientes de diversas fuentes: corrientes "naturales" de tierra de baja intensidad, corrientes procedentes de sistemas de tracción, de líneas de transporte de energía falladas, de descargas atmosféricas. Estas variaciones de voltaje pueden alcanzar niveles peligrosos para las personas o para la aislación de los equipos y provocar perturbaciones.

Desde el punto de vista de seguridad, el objetivo de una puesta a tierra es limitar estas diferencias de potencial, evitando que alcance niveles peligrosos para el personal de explotación y mantenimiento, así como también para los usuarios y equipos de una instalación. Normalmente, el control de potenciales se logra estableciendo conexiones conductivas de baja impedancia entre las diferentes partes metálicas de la instalación (bastidores, estructuras metálicas, cubiertas protectoras, pantallas de cables, etc.) y entre esas partes y el terreno sobre el que se encuentran.

Al ocurrir una anomalía en el funcionamiento de un sistema eléctrico, de origen interno o externo, las partes bajo tensión de una instalación (equipos de poder, control, comunicaciones, etc.) pueden quedar sometidos a diferencias de potencial con respecto a partes metálicas expuestas, que ocasionen la falla de la aislación del equipo. Otro objetivo de la puesta a tierra será restringir estas diferencias de potencial a valores compatibles con el nivel de aislación utilizado en los equipos.

Los conductores metálicos que constituyen una puesta a tierra, introducen una resistencia en el trayecto de corriente común a todos los circuitos

conectados a ella. Específicamente en instalaciones de telecomunicaciones, las diferencias de voltaje que se manifiestan en los terminales de esta resistencia pueden generar diafonía, interferencias, ruidos y dificultades de señalización. En instalaciones electrónicas, el objetivo principal está relacionado con el control de interferencias que afectan a los sistemas de procesamiento de información, de modo de asegurar el comportamiento técnicamente adecuado de estos sistemas.

Desde el punto de vista del comportamiento y seguridad de un sistema eléctrico, una puesta a tierra cumple diversas funciones, algunas de las cuales son exclusivas o prioritarias. Ejemplos de estas funciones son:

- Contribuir a establecer valores de tensión adecuadamente bajos entre las fases sanas y tierra, durante fallas a tierra en los sistemas de potencia.
- Proporcionar una vía de baja impedancia para la operación rápida y eficaz de las protecciones (relés, fusibles, pararrayos, etc.) de las instalaciones o equipos.
- Conducir a tierra, en forma eficiente, las corrientes provenientes de descargas atmosféricas, limitando las diferencias de potencial que pudieran producirse en la instalación.
- Evitar la ocurrencia de voltajes peligrosos entre estructuras o cualquier elemento expuesto y el terreno, tanto durante fallas como en condiciones normales de operación.
- Evitar gradientes de potencial peligrosos sobre la superficie del suelo durante fallas del sistema o descargas atmosféricas, en un área determinada.
- Asegurar, en los sistemas de baja tensión, la reducción de los efectos de inducción de voltaje por parte de sistemas de transmisión o instalaciones eléctricas de potencia.
- Limitar a valores prescritos, la diafonía y los ruidos inducidos en los circuitos de telecomunicaciones.
- Asegurar el empleo de la tierra como trayecto de retorno para sistemas eléctricos o electrónicos con retorno por tierra. Es el caso de instalaciones de tracción eléctrica, neutro en instalaciones de distribución, circuitos de telefonía con onda portadora, protección catódica, transmisión de energía en corriente continua.

1.2. Requisitos de una puesta a tierra

Los objetivos establecidos y la función encargada a una puesta a tierra, determina para ella ciertas características o requisitos. Estos requisitos se dividen en dos categorías: requisitos de proyecto, que establecen las características generales de la puesta a tierra para que cumpla con los objetivos fundamentales perseguidos y requisitos de diseño, esto es, características que deben tener los constituyentes de la puesta a tierra, para que sea efectiva, duradera, soporte las solicitaciones máximas a que

puede quedar sometida, etc.

Requisitos de proyecto:

Los requisitos normales de proyecto de un sistema de puesta a tierra, son:

- Obtener, como máximo, un cierto valor preestablecido de la resistencia de puesta a tierra.
- Obtener, como máximo, un cierto valor preestablecido de la impedancia a impulso de la puesta a tierra.
- Dimensionar la puesta a tierra de modo de cumplir con el objetivo de seguridad para las personas.
- Tomar las acciones necesarias para evitar riesgos de daños en los equipos.
- Asegurar compatibilidad de operación para equipos que cumplen distinta función (normalmente, equipos de procesamiento de información con los correspondientes equipos de potencia)

Requisitos de diseño:

Los requisitos normales de diseño son:

- Los diferentes elementos constituyentes de la puesta a tierra deben ser capaces de conducir las corrientes derivadas a tierra, durante el tiempo máximo posible, sin sobrecalentamiento de sus partes. Esto es aplicable tanto a los elementos que conforman la toma de tierra propiamente tal, como a los elementos que interconectan la toma de tierra con los equipos y estructuras (cables de conexión, prensas, conectores, etc.).
- Los elementos constituyentes de la puesta a tierra deben soportar, sin deterioro, los esfuerzos mecánicos a que pueden quedar sometidos durante las faenas de construcción de ésta u otras faenas contemporáneas.
- Estos elementos deben ser resistentes al eventual ataque corrosivo del terreno y la atmósfera.
- Evitar el uso en la puesta a tierra, de materiales que pudieran producir una corrosión galvánica de importancia en otros elementos metálicos enterrados e interconectados con la puesta a tierra.
- Los conductores de conexión a la puesta a tierra deben sobredimensionarse y/o protegerse en aquellos casos en que un calentamiento normal (aceptado en otras circunstancias), pudiera dar lugar a incendios debido a la presencia de materiales de fácil combustión o inflamables.
- En zonas con emanaciones gaseosas inflamables deberá recurrirse a métodos adecuados para evitar en su totalidad posibles arcos eléctricos entre partes metálicas o entre partes metálicas y el terreno.

1.3. Definiciones

Con el objeto de mantener una clara comprensión de los conceptos

involucrados en el tema, es conveniente definir algunos términos usados frecuentemente en el proyecto y diseño de puestas a tierra.

Poner a tierra

Es una acción intencional, de carácter general, mediante la cual los elementos metálicos expuestos de una instalación y/o partes de sus circuitos eléctricos, se unen conductivamente a tierra o a un cuerpo conductor de dimensiones relativamente grandes, que hace las veces de tierra. El objetivo perseguido es establecer el potencial de tierra (o del cuerpo conductor), en los elementos metálicos y/o partes de circuitos.

Conectar a tierra

Es una acción física intencional, de carácter particular, para unir conductivamente un determinado elemento metálico o circuito de una instalación, con la puesta a tierra correspondiente.

Toma de tierra

Cuerpo conductor o conjunto de cuerpos conductores en contacto eléctrico con tierra, concebido o utilizado para dispersar las corrientes eléctricas por el terreno.

Conductor de tierra

Conductor o conjunto de conductores que enlazan la toma de tierra al colector de tierra. Tratándose de conexiones parcialmente enterradas, esta definición es válida únicamente para los tramos aislados eléctricamente del terreno, mientras que los tramos en contacto con el terreno, forman parte de la toma de tierra.

Colector de tierra

Conductor en forma de barra o anillo al que están conectados, por un lado, el o los conductores de tierra y por otro lado, el sistema de distribución de tierra.

Sistema de distribución de tierra

Conjunto de conductores que enlazan el colector de tierra con las distintas partes que han de ponerse a tierra.

Instalación de tierra (Puesta a tierra)

Conjunto formado por la toma de tierra, el o los conductores de tierra, el colector de tierra y el sistema de distribución de tierra. Conforme al objetivo principal de una puesta a tierra, particularmente en instalaciones de potencia, se acostumbra clasificar a éstas en :

Instalación de tierra de operación (o de servicio)

Puesta a tierra utilizada para asegurar el funcionamiento adecuado y

correcto de las instalaciones y equipos de un sistema eléctrico. Para este fin se conectan neutros de transformadores y máquinas rotatorias, condensadores de acoplamiento, circuitos secundarios de fuerza y alumbrado, secundarios de transformadores de corriente y potencial, y medios que se usen para descargar sobre-voltajes (pararrayos, descargadores, etc.)

Regularmente se entenderá por tierra de servicio la puesta a tierra de un punto de la alimentación, en particular el neutro del empalme en caso de instalaciones conectadas en BT o el neutro del transformador que alimente la instalación en caso de empalmes en media o alta tensión, alimentados con transformadores monofásicos o trifásicos con su secundario conectado en estrella.

Instalación de tierra de protección

Puesta a tierra empleada para conectar a tierra los elementos metálicos "expuestos", con los que una persona puede estar en contacto y que normalmente no deben estar con tensión (carcasas, gabinetes, estructuras metálicas). De este modo se limitan a valores inofensivos las diferencias de tensión accidentales. Se entenderá por tierra de protección según la Norma chilena, a la puesta a tierra de toda pieza conductora que no forma parte del circuito activo, pero que en condiciones de falla puede quedar energizada. Su finalidad es proteger a las personas contra tensiones de contacto peligrosas.

En general se usa la puesta a tierra de protección de MT en la subestación como puesta a tierra de servicio, atendiendo regularmente a problemas de espacio. En condiciones especiales, determinadas por los requerimientos de un proyecto en particular, se podrá separar la tierra de servicio de BT de la tierra de protección de MT. Cualquiera sea la condición, ésta deberá quedar claramente establecida y justificada en el proyecto.

Con respecto a los conductores metálicos que constituyen la toma de tierra, podemos agregar los siguientes conceptos:

Electrodo de tierra

Es la toma de tierra más simple. Consiste generalmente en un tramo recto de conductor, enterrado en forma horizontal o vertical en el terreno. Una combinación de electrodos simples constituye un electrodo compuesto.

Malla de tierra

Es una toma de tierra común para todos los elementos metálicos y circuitos de una instalación, que tiene como función adicional, el controlar las sollicitaciones de tensión a que pueden quedar sometidas las personas dentro del área abarcada por ésta. Generalmente consiste en un reticulado de conductores interconectados y enterrados a cierta profundidad en el terreno. Puede estar conectada con otras puestas a tierra, mallas de tierra o electrodos auxiliares de puestas a tierra, para

mejorar sus características y/o las del conjunto.

Electrodo auxiliar de toma de tierra

Electrodo elemental, generalmente alejado de la toma de tierra principal, cuya función es mejorar las características de ésta.

Malla equipotencial

Conjunto de conductores instalado sobre o bajo tierra (u otro medio), conectado a una toma de tierra principal. Su función exclusiva es establecer un potencial uniforme en el área abarcada.

Sistema de puesta a tierra

Es la interconexión intencional de las diferentes puestas a tierra en un área determinada, con el objeto de mejorar las características del conjunto.

Tierra remota o de referencia

Es un punto o zona de la tierra, suficientemente distante, tal que la resistencia mutua con el electrodo, puesta a tierra o sistema de puesta a tierra, sea nula. En otros términos, el potencial del punto o zona considerada como la tierra remota, no varía ante variaciones de la corriente dispersada por el electrodo, puesta a tierra o sistema de puesta a tierra en cuestión.

Tal como ha sido definida, la tierra remota está ubicada teóricamente a una distancia infinita. Sin embargo para fines prácticos, toda zona a partir de una cierta distancia mínima desde la toma de tierra, puede considerarse como la tierra remota. Esta distancia mínima depende por un lado, de las dimensiones de la toma de tierra y por otro lado, de la precisión aceptada en la medición, cálculo o análisis de una toma de tierra.

Zona de influencia

Comprende a todo el volumen de terreno involucrado desde la superficie del electrodo hasta la tierra remota práctica. Cualquier conductor ubicado en el interior de la zona de influencia, será afectado en algún grado, cuando circule corriente por el electrodo hacia el terreno. En particular también incluye la superficie del terreno.

Resistencia de puesta a tierra

Es la resistencia existente entre la puesta a tierra y la tierra remota. Se calcula como el cociente entre el potencial adquirido por la puesta a tierra respecto a la tierra remota y la corriente dispersada.

Referencias

IEEE Standard 80 - 2000: "Guide for safety in alternating-current substations Grounding".

CAPITULO 2

CONDUCCION ELECTRICA EN TERRENOS

Para caracterizar la conducción eléctrica a través de un material, se define la conductividad eléctrica o su recíproco, la resistividad. La resistividad específica de un material corresponde a la resistencia al paso de una corriente continua, entre las caras paralelas opuestas de una porción de material de longitud y sección unitaria uniforme. En el sistema MKS, la resistividad queda expresada en Ohm-metro.

En realidad, el terreno es un dieléctrico pero su capacidad interesa sólo cuando se presenta la combinación de extremadamente alta resistividad con sobretensión de muy alta frecuencia o de reducidísimo tiempo de subida. El umbral puede obtenerse a través de la constante de tiempo del terreno según su equivalente circuital:

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC} = \frac{1}{\rho k' \epsilon_0} \quad (2.1)$$

Con los valores típicos de resistividad y constante dieléctrica relativa del terreno k' , esta frecuencia umbral es del orden de algunos mega Hz.

Por otro lado, con muy altos valores de corriente dispersados a tierra por el electrodo, puede ocurrir la ruptura dieléctrica del terreno alrededor del

electrodo, debido a la superación de un valor de densidad de corriente crítica o un valor de intensidad de campo crítico, ambos relacionados. Esto naturalmente influye en el parámetro resistividad del terreno en la zona afectada y es decisivo en el valor de la impedancia de puesta a tierra. La resistividad en la zona de descarga es variable y depende de parámetros tales como: tiempo transcurrido desde el inicio de la descarga, valor del campo eléctrico crítico, tiempo transcurrido desde el comienzo de la des-ionización, resistividad del terreno en condiciones de no descarga, etc. Diversos trabajos han analizado este fenómeno, incorporando el efecto de descargas mediante un aumento en el diámetro del electrodo, o bien, según otra interpretación equivalente, suponiendo que una porción del terreno en el entorno del electrodo cambia bruscamente el valor de su resistividad desde un valor original (condiciones de no ruptura) hasta un valor similar a la resistividad del conductor.

2.1. Clasificación de suelos

Los dos principales constituyentes de suelos, el óxido de silicio y el óxido de aluminio, son excelentes aislantes eléctricos; no obstante, normalmente es posible detectar una conducción eléctrica apreciable en el terreno. La justificación se encuentra en las siguientes razones:

- a) La conductividad del suelo se debe en gran medida a la presencia de humedad y sales en solución en los intersticios dejados por las formaciones rocosas o masas minerales.
- b) La cantidad de corriente transportada puede alcanzar valores importantes aún en un mal conductor, si el volumen que participa es considerable.

De la primera observación se deduce que el proceso de conducción en suelos es de carácter electroquímico y depende de factores como:

- Porosidad de materiales componentes del terreno
- Distribución y disposición de los poros
- Conductividad del agua que llena los poros.

Este último parámetro se compone a su vez de una conductividad primaria (la propia del agua) y una conductividad secundaria (la adquirida por disolución del material y sales) que depende del estancamiento.

De este modo, considerando el tipo de agua que llena los poros del material que compone el terreno y la resistividad del agua, es posible una clasificación estimativa de los terrenos de acuerdo a su resistividad según se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Resistividades de distintos tipos de terreno

<i>Tipo de terreno</i>	ρ (Ohm-metro)
terrenos vegetales húmedos	10 - 50
arcillas, gredas, limos	20 - 60
arenas arcillosas	80 - 120
fangos, turbas	150 - 300
arenas	250 - 500
suelos pedregosos	300 - 400
rocas	1000 - 10.000
concreto húmedo	100 - 240
concreto seco	10.000 - 50.000

Estos valores estimativos pueden usarse con buen criterio, sólo en caso de imposibilidad de conocer la resistividad real mediante mediciones en el terreno.

En cuanto a la segunda observación, respecto de corriente transportada y volumen de terreno implicado, habría que destacar dos aspectos:

Toda corriente que fluye a través de un medio de alta resistividad, genera una diferencia de potencial importante en el medio. De lo que se desprende que la circulación de corriente por el terreno puede desarrollar un gradiente de potencial elevado y afectar extensas regiones, en particular sobre la superficie del suelo.

Un análisis riguroso de la distribución de corrientes en el terreno es muy difícil, sino imposible, por cuanto éste no es homogéneo en la gran mayoría de los casos. Y éste corresponde precisamente al segundo aspecto: la resistividad del terreno varía tanto en sentido horizontal como vertical. En general la variación de resistividad en la dirección horizontal es reducida comparada con las dimensiones normales de una puesta a tierra y puede por lo tanto ser despreciada.

Por consiguiente, en los casos prácticos, un terreno puede ser razonablemente representado por un modelo de estratos paralelos a la superficie del suelo, caracterizado cada uno de ellos por su espesor y un valor constante de resistividad, tal como lo muestra la Figura 2.1. El estrato homogéneo más profundo se considera de espesor infinito.

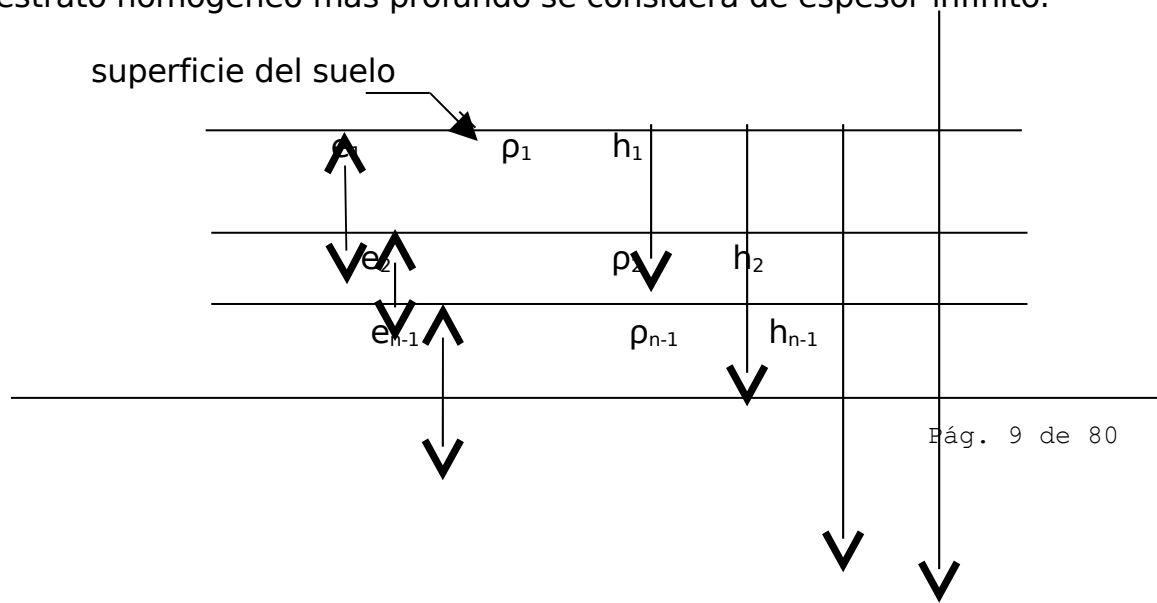




Figura 2.1: Modelo de un terreno estratificado.

2.2. Variables que afectan la resistividad de un terreno.

Para un tipo de terreno determinado, su resistividad puede verse significativamente afectada por un cambio de humedad, temperatura o compactación.

a) Influencia de la humedad y temperatura.

La mayoría de los terrenos son muy buenos aislantes cuando su contenido de humedad es cero. Sin embargo, su comportamiento con humedad inferior al 2% es de poco interés práctico ya que tal estado rara vez se encuentra en la realidad. Tanto un aumento de humedad como de temperatura generan una reducción en el valor de resistividad; sin embargo, el grado de dependencia varía según dos zonas normalmente bien marcadas: la sensibilidad es muy fuerte en la zona de bajos porcentajes de humedad y bajas temperaturas, pero se reduce notablemente con altos valores de humedad o temperatura.

Existe una expresión analítica aproximada que intenta cuantificar la influencia de estos dos parámetros en el valor de resistividad y que pretende ser independiente del tipo de terreno: [2]

$$(2.2) \quad \rho = \frac{1,3 \times 10^4}{(1 + 0,73 H^2)(1 + 0.03 T)} \quad T > 0^\circ\text{C}$$

En esta expresión, conocida como "ecuación de Albrecht", se incorpora la humedad del suelo, en % de peso (H) y su temperatura en grados Celcius (T). Se recomienda su utilización sólo para el cálculo comparativo de la influencia de los parámetros en la resistividad del terreno.

De lo señalado, cabe esperar que la resistividad de un terreno varíe sustancialmente según las estaciones del año, en particular la zona próxima a la superficie. Esto trae como consecuencia, en primer lugar, la conclusión que un conjunto de electrodos enterrados a mayor profundidad tiene características más estables que uno superficial; en segundo lugar, es recomendable efectuar las mediciones de campo en la época del año en que se prevé un mayor valor, lo cual otorga mayor

seguridad al diseño de la puesta a tierra. Normalmente por lo tanto, será conveniente efectuar las medidas de campo durante el verano.

b) Influencia de compactación del suelo.

Una mayor compactación del suelo disminuye la distancia entre las partículas y se logra una mejor conducción a través de la humedad contenida. A medida que se aumenta el contenido de humedad, se alcanza una especie de saturación ya que el agua envuelve la mayoría de las partículas y un mayor acercamiento entre éstas no influye en la conducción.

2.3. Medición de la resistividad del terreno

La resistividad del terreno es de importancia decisiva en el proyecto de una puesta a tierra y la única forma de conocerla con exactitud es mediante medidas directas de campo. En líneas generales, la medida se efectúa según una cierta disposición de electrodos de corriente y de potencial.

Teniendo presente el modelo de terreno estratificado de la Figura 2.1 el objetivo de las mediciones es conocer la resistividad y espesor de cada una de las capas constituyentes, hasta una profundidad que depende de la zona de influencia de la puesta a tierra; esta zona puede definirse como aquella limitada por la profundidad a la cual el potencial tiene un valor igual al 5% del potencial de la puesta a tierra. Sin embargo, las diversas configuraciones básicas de electrodos posibles suponen para cada medida la existencia de un medio homogéneo, lo cual conduce a la determinación de una "resistividad aparente", que depende de las distancias particulares a las que se ubican los electrodos. La resistividad aparente ρ_a puede definirse como aquélla correspondiente a un terreno homogéneo en el cual, para la disposición dada de electrodos e igual magnitud de corriente inyectada al medio, se produce una misma elevación de potencial medida en el terreno no homogéneo.

La resistividad aparente, o resistividad del terreno homogéneo equivalente, no corresponde necesariamente a ninguno de los valores de resistividad presentes en el terreno no homogéneo, pero sí depende de las características de éste. El comportamiento de ρ_a con la separación de los electrodos proporcionará una guía para la determinación de las características de resistividad del terreno.

Las configuraciones básicas de electrodos usualmente empleadas pueden clasificarse en configuraciones de tres y cuatro electrodos, respectivamente. La configuración de tres electrodos o barra piloto se usa preferentemente para medir resistencias efectivas de puesta a tierra y escasamente para deducir valores de resistividad del terreno.

Configuración de cuatro electrodos.

Tal como lo muestra el esquema de medición de la Figura 2.2, los cuatro electrodos se ubican sobre un mismo eje; se inyecta corriente al terreno a través de los electrodos de corriente externos y se mide la diferencia de potencial entre los electrodos de potencial internos.

La corriente inyectada puede ser corriente continua conmutada o corriente alterna de baja frecuencia. Se evita el uso de corriente continua plena pues produce el fenómeno de "polarización" (acumulación de gas en el electrodo negativo) lo cual se traduce en un aumento artificial de la resistividad aparente.

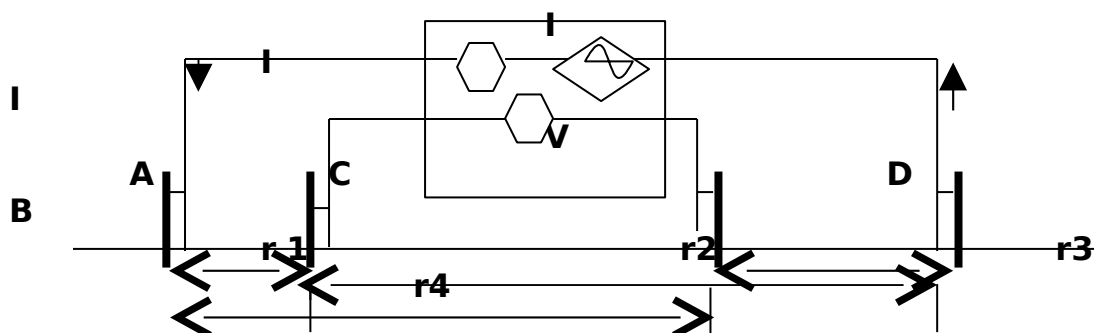


Figura 2.2: Configuración general de cuatro electrodos.

Los electrodos se ubican a distancias relativamente grandes comparadas con la profundidad de enterramiento, de modo de suponerse a éstos como fuentes puntuales de corriente. Se sabe que si no existen campos de potencial perturbador, el potencial en un punto de un terreno homogéneo de resistividad ρ , a distancia x de una fuente puntual de corriente I , está dado por:

$$\phi(x) = \frac{\rho I}{2\pi x} \quad (2.3)$$

Combinando (2.3) para los cuatro electrodos, puede demostrarse que la resistividad del terreno supuesto homogéneo, conocidos V , I y la posición de los electrodos, está determinada por:

$$\rho_{ap} = \frac{2\pi (V/I)}{(1/r_1 - 1/r_2) - (1/r_3 - 1/r_4)} \quad (2.4)$$

Si el terreno en realidad no es homogéneo, ρ_{ap} corresponde a la resistividad aparente.

Según la ubicación relativa de los electrodos, se distinguen las siguientes

alternativas más empleadas:

-

Configuración de Wenner:

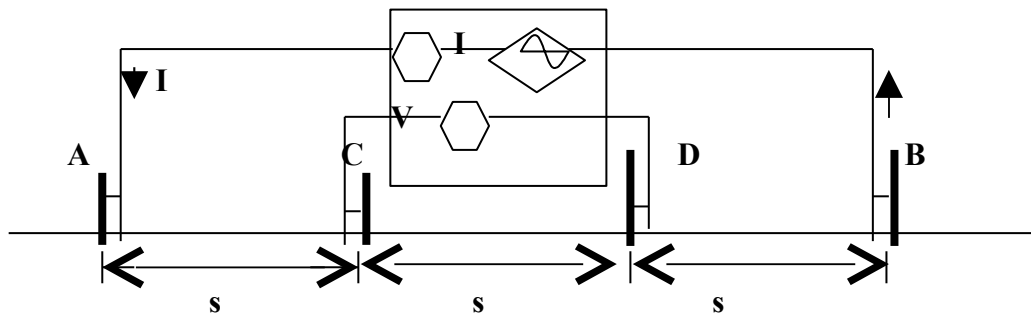


Figura 2.3: Configuración de Wenner.

Los cuatro electrodos se ubican en línea recta, separados entre sí una misma distancia "s". Al iniciar las mediciones, se deberá elegir un centro de medida 0, el cual permanecerá fijo, aún cuando se modifique la separación s. En esta configuración la expresión (2.4) se reduce a:

$$\rho_{ap} = 2\pi (V/I) s \quad (2.5)$$

Configuración de Schlumberger.

Los cuatro electrodos se ubican en línea recta, cada par (potencial y corriente) simétricamente ubicados con respecto al centro de medición elegido.

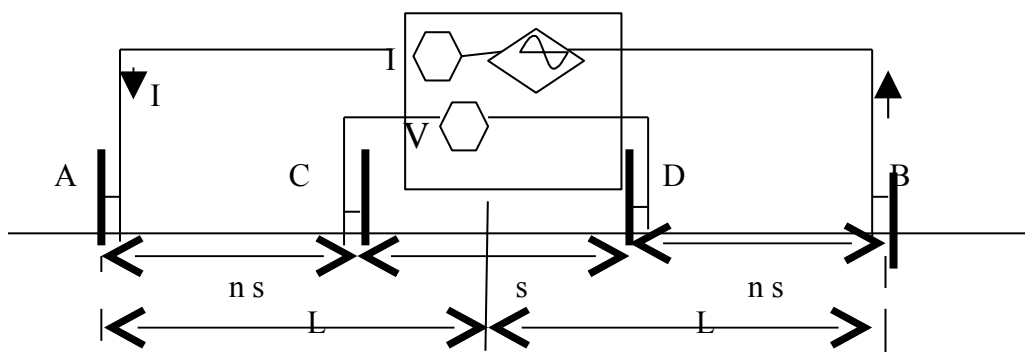


Figura 2.4: Configuración de Schlumberger.

Siendo "s" la separación entre electrodos de potencial, la distancia "L" del centro de medición a cada electrodo de corriente queda definida por:

$$L = (n + 0.5) s \quad (2.6)$$

con la cual la expresión (2.6) puede colocarse de la forma:

$$\rho = \pi (V/I) n (n+1) s$$

(2.7)

o bien:

$$\rho = \pi (V/I) [(L/s)^2 - 0.25] s$$

(2.8)

Comparación entre las configuraciones de Wenner y Schlumberger

La configuración de Wenner presenta las siguientes ventajas:

- La interpretación de los valores de R medidos en terreno, es más directa en términos de resistividad aparente. Esto permite visualizar con facilidad la tendencia del gráfico de campo.
- Los instrumentos pueden ser de menor sensibilidad que los empleados con la configuración de Schlumberger, ya que a medida que se separan los electrodos de corriente, también lo hacen los de potencial.

La configuración de Schlumberger presenta las siguientes ventajas:

- Esta configuración es menos sensible a las variaciones laterales del terreno o buzamiento de los estratos, debido a que los electrodos de potencial permanecen inmóviles.
- La realización práctica de la medición es más expedita, ya que sólo se desplazan los electrodos de corriente.

2.4. Métodos de medida.

En realidad, los métodos de medida de resistividad del terreno forman parte de una de las diversas técnicas de exploración geofísica, aplicadas a la exploración de los recursos del subsuelo, entre otros. Los cuatro grupos principales entre las técnicas de exploración geofísica son los métodos eléctricos, sísmicos, gravimétricos y magnéticos. Los métodos eléctricos utilizan fuentes artificiales (se provocan corrientes eléctricas en el terreno) y se dividen en métodos inductivos y conductivos. Los primeros requieren el uso de frecuencia hasta de varios kHz y la medición del campo electromagnético generado por las corrientes inducidas en el terreno. Los últimos utilizan corriente continua conmutada o alterna de baja frecuencia. Entre los métodos conductivos, los más importantes son los métodos de resistividad y de entre éstos, el Sondeo Eléctrico Vertical y el Perfil de resistividad.

a) Sondeo Eléctrico Vertical.

Su finalidad es la determinación del número de capas del subsuelo, espesor y resistividad eléctrica de las mismas, mediante mediciones efectuadas en la superficie. Cualquiera sea la configuración de electrodos empleada, el centro y el eje de medición se mantienen fijos mientras se aumenta la separación entre electrodos: en la configuración de Wenner se desplazan respecto del centro de medición los electrodos de corriente y de potencial; en la configuración de Schlumberger se mueven solamente los electrodos de corriente.

Con los valores de potencial y corriente medidos y la expresión correspondiente a la configuración utilizada, se grafica una curva de resistividad aparente en función de la separación de los electrodos. Si se ha empleado la configuración de Wenner se traza en función de s y en función de $L = (n + \frac{1}{2}) s$, para la configuración de Schlumberger. La forma de estas curvas, como se verá posteriormente, da luz respecto del número de capas, espesor y resistividad de cada capa. Naturalmente se debe cubrir la mayor dimensión lineal de la futura malla de tierra y si es posible, obtener información según dos ejes perpendiculares entre sí.

b) Perfil de resistividad.

Es usado principalmente para detectar variaciones horizontales de la resistividad y como complemento para la interpretación de las medidas por sondeo eléctrico. Cualquiera sea la configuración usada, se mantiene invariable la separación entre electrodos, trasladándose lateralmente el conjunto según una línea perpendicular al eje de medición. Generalmente se repiten las mediciones para distintas separaciones entre electrodos, trazando gráficos de resistividad perpendicular a la línea de medición.

c) Electrodo de potencial adicional.

Una forma alternativa de detectar variaciones horizontales de la resistividad ocupando sólo el esquema de realizaciones del Sondeo eléctrico vertical, consiste en ubicar simétricamente con respecto a los otros dos, un tercer electrodo de potencial. Un desequilibrio de los potenciales medidos desde este tercer electrodo hacia uno u otro lado, evidencia una variación horizontal proporcional al desequilibrio. El valor de resistividad medido entre los electrodos de potencial exteriores corresponde al promedio de los valores con respecto al tercer electrodo.

Si a medida que aumenta la separación entre electrodos en el Sondeo eléctrico el desequilibrio de potenciales también se incrementa, debe concluirse que las variaciones horizontales de la resistividad son importantes y puede ser indispensable la realización de una investigación más rigurosa a través de un Perfil de resistividad.

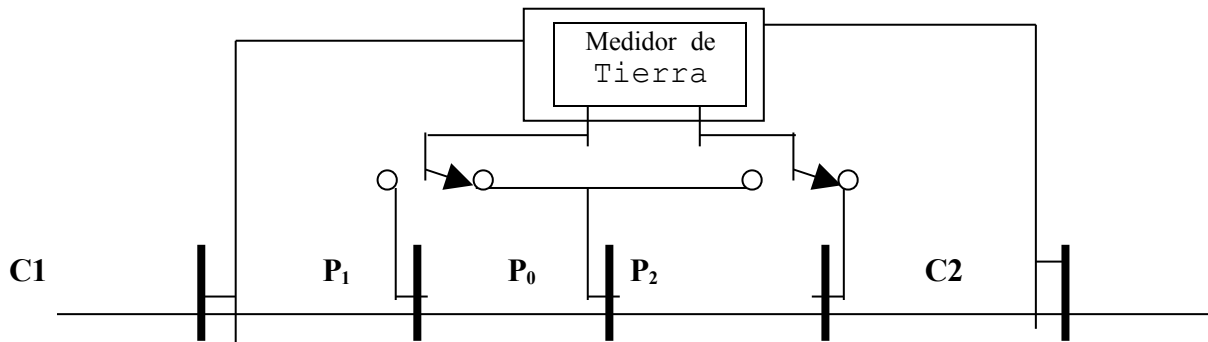


Figura 2.5: Sistema de conmutación para la lectura con el método de Lee.

2.5. Interpretación de las curvas de resistividad

Probablemente una de las etapas más difíciles en la determinación de resistividades de terreno es la interpretación adecuada de las medidas de campo. Conjuntamente con los métodos de medida, se dispone de diversos métodos de interpretación en su mayoría empíricos, todos los cuales suponen la existencia de estratos paralelos; así, tenemos:

a) Método de los quiebres de curvas de resistividad.

La forma de las curvas de resistividad aparente en función de separación entre electrodos depende del número de capas a que puede asimilarse el terreno y del valor relativo de las resistividades de cada una de las capas.

El método de Wenner en este caso ofrece una interpretación más directa de la curva de resistividad, visualizando la tendencia de la curva obtenida por sondeo eléctrico. Consideremos el ejemplo sencillo definido por la curva de campo de la Figura 2.6.

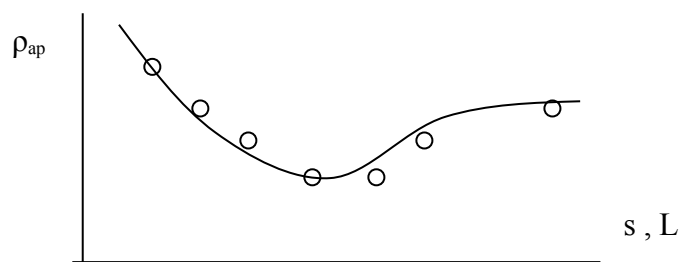


Figura 2.6: Curva de resistividad aparente obtenida en terreno.

Es evidente que para valores pequeños de "s" comparados con el espesor de la primera capa, ρ_a tenderá al valor de resistividad ρ_1 de la primera capa de terreno; para valores de s grandes, ρ_a dependerá fundamentalmente de la resistividad ρ_n de la capa inferior tendiendo a ella en el límite. En el ejemplo se ha supuesto $\rho_1 > \rho_n$.

En general, las curvas de resistividad aparente se aproximan en forma asintótica a los valores de resistividad de la primera y última capa. El número de capas o estratos a que puede asimilarse el terreno se determina por el número de puntos de inflexión que posee la curva de resistividad aparente, aumentado en uno. A continuación se entrega las diferentes combinaciones para sistemas de dos, tres y cuatro capas.

I) Sistemas de 2 capas: En un sistema de 2 capas existen dos posibles combinaciones de valores relativos, que se reducen a :

- a) $\rho_1 < \rho_2$
- b) $\rho_1 > \rho_2$

II) Sistema de 3 capas: En un sistema de 3 capas existen 6 posibles combinaciones relativas de resistividades que se acostumbra agrupar en 4 tipos que muestra la Figura 2.8.

III) Sistemas de 4 capas: Para un sistema de 4 capas existen 24 posibles combinaciones relativas de resistividad que se acostumbra agrupar en los 8 tipos siguientes:

Tipo QQ :	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$	(1 subtipo)
QH :	$\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$	(3 subtipos)
HK :	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$	(5 subtipos)
KQ :	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$	(3 subtipos)
HA :	$\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$	(3 subtipos)
AK :	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4$	(3 subtipos)
KH :	$\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4$	(5 subtipos)
AA :	$\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$	(1 subtipo)

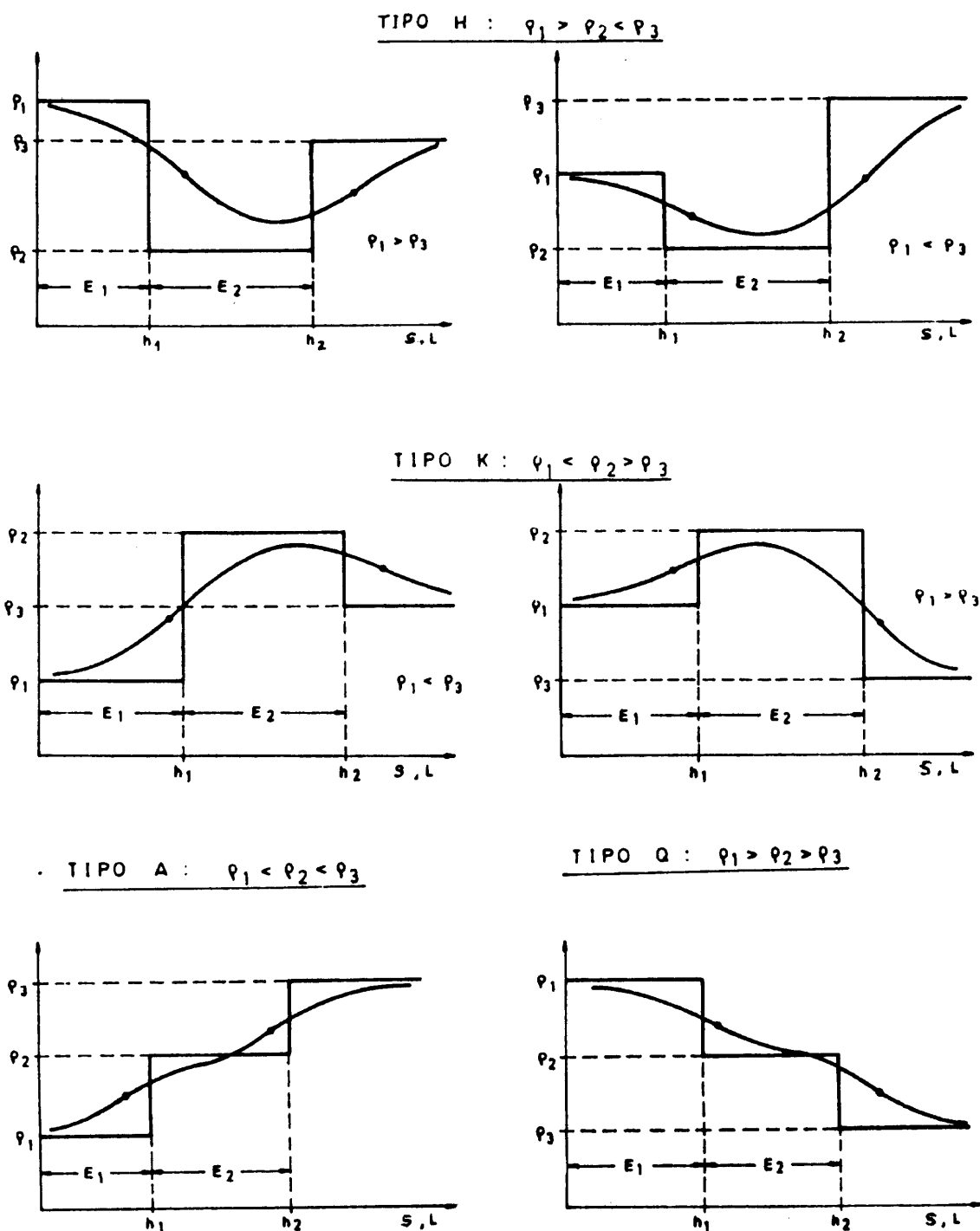


Figura 2.7: Posibles combinaciones relativas de resistividades de un sistema de 3 capas.

b) Método de curvas patrón.

Este método se basa en la conciliación práctica entre el problema

interpretativo directo y el inverso. Manteniendo la suposición de terreno estratificado, con capas paralelas a la superficie del terreno, la teoría geo-eléctrica define una solución única para el primero, mientras que el problema inverso no tiene solución única.

En efecto, el problema de calcular teóricamente la curva de sondeo eléctrico con una configuración de electrodos determinada, para un corte geo-eléctrico definido, está resuelto y existen numerosas curvas teóricas de resistividad llamadas "Curvas Patrón", que contemplan combinaciones de capas de diferentes resistividades y espesores.

El problema inverso, que es el que nos preocupa, se plantea: dada una curva de sondeo eléctrico vertical obtenida mediante medidas de campo, deducir y conocer la estructura geo-eléctrica que la ha producido. Este problema no tiene solución única, en el sentido que la estructura deducida a partir de una curva de campo puede no representar exactamente la realidad, aunque su interpretación sea correcta de un modo formal.

En la práctica, suponiendo que a cada curva de campo le corresponde una única estructura, se compara la curva de campo con las curvas de resistividad aparente patrón. Si se obtiene un calce perfecto entre la curva de terreno y una curva patrón, se supone que la estructura del terreno es idéntica a la teórica. Las curvas se construyen en papel bi-logarítmico y están normalizadas, con el objeto de independizarse de las unidades y magnitudes de la medición, interesando sólo la forma de ella. La curva de terreno debe hacerse por lo tanto igualmente en papel bi-logarítmico, de la misma dimensión por década que el de las curvas patrón a emplear y transparente para facilitar la comparación. La experiencia demuestra que los resultados conseguidos con este método son satisfactorios.

De estas curvas patrón las de mayor uso en nuestro país son las de Orellana y Mooney [3]. En esta obra se entregan Tablas y curvas patrón para sondeo eléctrico vertical; las tablas se aplican a la configuración de Wenner y Schlumberger y las curvas solamente a esta última disposición.

c) Interpretación mediante computador

También es posible representar en forma computacional estas curvas y efectuar el ajuste por pantalla, ingresando la curva de terreno, o bien proceder a un ajuste automático de los datos de terreno por algún método de adaptación de curvas.

En [4] se presenta un procedimiento computacional que se puede dividir en dos partes, según su función específica:

a) Generación de una curva de resistividad aparente teórica,

propia de un modelo idealizado de terreno estratificado.

Esta parte del programa permite generar la curva de resistividad aparente, a partir de los parámetros característicos de un modelo de terreno estratificado y con una configuración electródica definida. Es posible en consecuencia, si se desea, generar cada una de las curvas patrón de la referencia [1].

b) Asociación de la curva de resistividad aparente medida en terreno, con un modelo idealizado de terreno estratificado.

En este caso, el usuario ingresa a un procedimiento iterativo de ajuste de curvas de resistividad aparente: teniendo como referencia la curva obtenida de medidas de terreno, se trata de encontrar el modelo idealizado de terreno estratificado, al cual le corresponde dicha curva. De la observación de la curva experimental, el usuario podrá efectuar una primera estimación del número de capas del terreno, por el método de los quiebres o puntos de inflexión. Y según las tendencias asintóticas de la curva, propondrá una estimación del valor de resistividad de cada una de las capas.

A continuación se incluye en las siguientes Figuras el ajuste realizado para un terreno de tres capas; el gráfico contiene la curva experimental, la curva patrón seleccionada, ambas discretas y los parámetros de esta última. Se incluye además un listado del archivo de salida generado por el programa con los valores de resistividad aparente medida, calculada y el error entre ambas.

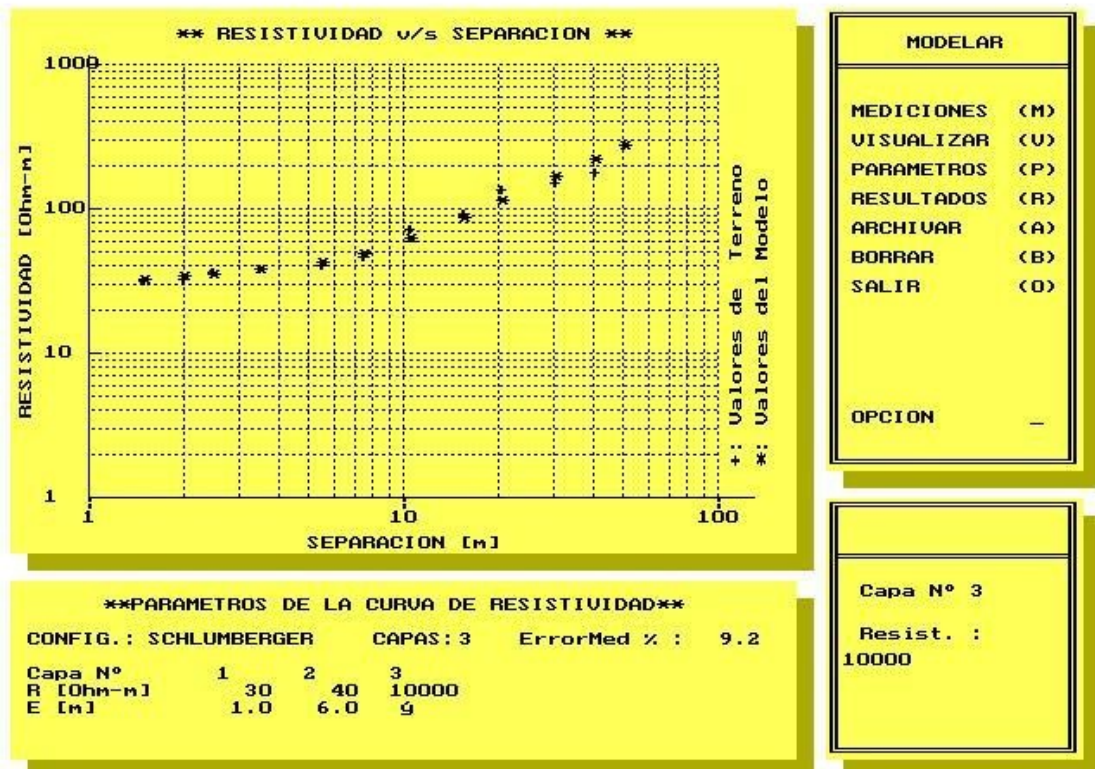


Figura 2.8 Ajuste de curvas para terreno de tres capas

**** VALORES RESISTIVIDAD MEDIDA Y CALCULADA ****
UTILIZANDO METODO DE MOONEY Y ORELLANA

RESULTADOS				
N	Separ.	Resis.Med.	Resis.Calc.	Error
1	1.0	39.5	30.8	22.1
2	1.5	31.0	32.0	3.3
3	2.0	31.2	33.4	6.9
4	2.5	34.9	34.7	0.4
5	3.5	37.7	37.2	1.3
6	5.5	39.6	42.2	6.5
7	7.5	45.7	48.3	5.6
8	10.5	69.1	60.2	12.9
9	15.5	90.5	84.5	6.6
10	20.5	131.9	110.7	16.1
11	30.5	145.8	163.6	12.3
12	40.5	171.5	216.0	25.9
13	50.5	266.8	267.8	0.4

Continuar: <ENTER>

MODELAR

MEDICIONES <M>
 VISUALIZAR <V>
 PARAMETROS <P>
 RESULTADOS <R>
 ARCHIVAR <A>
 BORRAR
 SALIR <O>

OPCION r

****PARAMETROS DE LA CURVA DE RESISTIVIDAD****

CONFIG.: \$SCHLUMBERGER CAPAS: 3 ErrorMed % : 9.2

Capa N°	1	2	3
R [Ohm-m]	30	40	10000
E [m]	1.0	6.0	9

Capa N° 3

Resist. :
10000

Figura 2.9 Valores obtenidos con ajuste computacional

2.6. Recomendaciones prácticas

Los equipos modernos de medida, utilizan un generador de corriente alterna de 100 a 130 Hz. La alimentación a los electrodos de corriente es entre 40 y 150 Volts y la salida de corriente puede ser desde algunos mili amperes a cientos de mili amperes.

Para efectuar una buena medida de resistividad de terreno, debe tenerse presente algunas recomendaciones generales:

- a) Elegir la línea o eje de medición en una dirección tal que no existan obstáculos importantes (rocas, árboles, edificios, matorrales, etc.).
- b) Establecer un centro de medición mediante un electrodo de potencial auxiliar si se usa el método de partición de Lee, o mediante una estaca.
- c) Iniciar la medición con separaciones pequeñas entre electrodos; por ejemplo: 0.5 m para la configuración de Wenner y 1 a 2 m. para la configuración de Schlumberger.

- d) Para la confección de los gráficos de campo de resistividad y su interpretación mediante los gráficos patrón, se recomienda las siguientes secuencias de s ó L :

0,5 ; 0,6 ; 0,8

1 ; 1,6 ; 2,0 ; 2,5 ; 3,0 ; 4,0 ; 5,0 ; 6,0 ; 8,0
10 ; 16 ; 20 ; 25 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 80
100 ; 160 ; etc.

- e) Las mediciones de resistividad aparente deben efectuarse hasta valores de s ó L , de 3 a 5 veces la profundidad que se desea investigar. No obstante, la tendencia de ρ_{ap} al aumentar s o L , puede indicar la necesidad o no de continuar la medición para valores mayores. Si el valor de ρ_{ap} muestra una tendencia asintótica definida a un determinado valor, no es necesario continuar con separaciones mayores de los electrodos.
- f) Los electrodos deben enterrarse poco profundos en las primeras mediciones para valores pequeños de s o L . Se recomienda $h \sim 0.1$ (s ó L). Para separaciones mayores se entierran aproximadamente 0,30 m.
- g) En terreno muy seco es recomendable verter un poco de agua en el contorno mismo de los electrodos; especialmente en los de corriente. Debe evitarse hacer charcos grandes, pues esto modifica la resistividad natural del terreno y falsea las mediciones. Además de verter agua, es conveniente apisonar un poco la tierra alrededor de los electrodos.
- h) Para la medición de las distancias entre electrodos se recomienda no utilizar huinchas metálicas. En caso de utilizarlas deben levantarse del suelo durante la medición.
- i) En ciertos instrumentos o sistemas de medición es posible que la resistencia de los cables de medición del voltaje, afecte las lecturas. Deben tenerse presente esta posibilidad.
- j) El método de partición de Lee con la configuración de Wenner proporciona una forma de comprobación de la medición y verificación de posibles variaciones laterales del terreno. Si el instrumento utilizado no dispone de conexiones para el electrodo central, puede instalarse un conmutador externo como el indicado en la figura 2.8.
- k) El método de Lee permite aumentar aproximadamente al doble el rango máximo de medición del instrumento. Si al usar la

disposición normal se excede la capacidad del instrumento, se puede medir en Lee y sumar los valores obtenidos.

Referencias

- [1] IEEE Standard 81
Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a
Ground system
- [2] E. Orellana, H. Mooney, "Tablas y Curvas Patrón para Sondeos Eléctricos Verticales",
Interciencia, Madrid, 1966.
- [3] Mario Tellez G "Programa computacional para estimación de parámetros geo-eléctricos
en base a medida de resistividad aparente de terreno" Memoria Ingeniero Civil Electricista,
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, 1985
- [4] Mazzetti, C. and Vecca, G. "Impulse behaviour of ground electrodes" IEEE Trans. Vol. PAS-
102, No. 9, September 1983
- [5] Velázquez, R. and Mukhedkar, D. "Analitical modelling of grounding electrodes transient
behaviour" IEEE Trans. Vol. PAS-103, No. 6, June 1984

CAPITULO 3

SITUACIONES DE RIESGO Y LÍMITES DEL PASO DE CORRIENTE ELECTRICA POR EL CUERPO HUMANO

3.1. Impedancias del cuerpo humano y resistencias de contacto

Cuando el cuerpo humano forma parte de un circuito eléctrico, el paso de corriente I_h a través de él está regido por la ley de Ohm:

$$I_h = \frac{V}{Z_h} \quad (3.1)$$

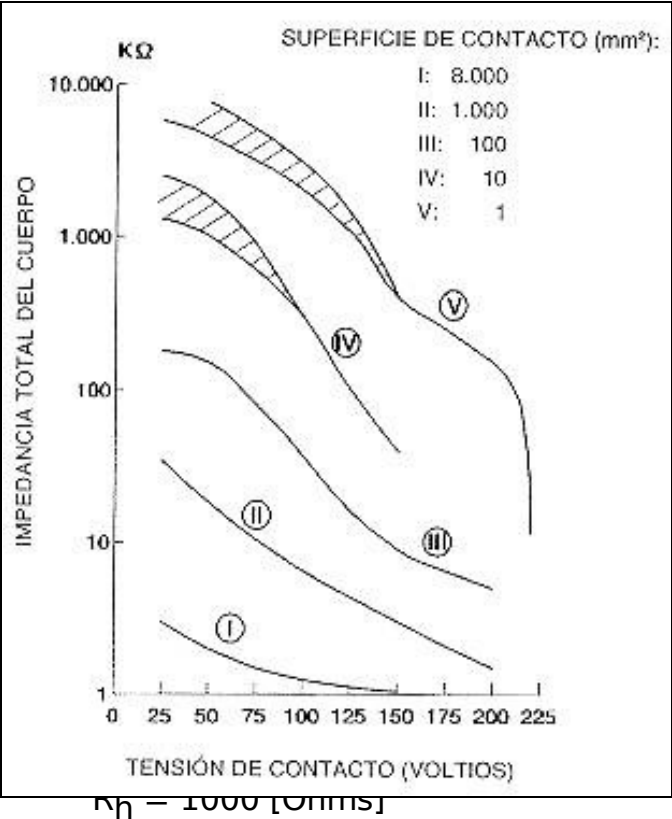
donde Z_h es la impedancia del cuerpo humano y V el valor efectivo de la tensión aplicada. En baja frecuencia, Z_h es esencialmente resistiva mientras que en alta frecuencia (sobre 1000 Hz) se comporta como una combinación resistiva-capacitiva no-lineal. Esta característica influye para que la resistencia de contacto entre el cuerpo y un conductor a potencial, constituya el primer factor limitador de la corriente a frecuencia industrial y baja tensión (240 Volts o menos), mientras que a alta frecuencia y alta tensión, su importancia sea mínima.

La siguiente tabla muestra los valores estadísticos de la impedancia del cuerpo humano en función de la tensión de contacto, para una trayectoria mano-mano.

Tensión de contacto (V)	Trayectoria mano-mano, piel seca, c. alterna, frecuencia 50-60 Hz, superficie de contacto 50-100 cm ²		
	Impedancia total (Ω) del cuerpo humano que no son sobrepasados por el		
	5% de las personas	50% de las personas	95% de las personas
25	1.750	3.250	6.100
50	1.450	2.625	4.375
75	1.250	2.200	3.500
100	1.200	1.875	3.200
125	1.125	1.625	2.875
220	1.000	1.350	2.125
700	750	1.100	1.550
1.000	700	1.050	1.500
valor asintótico	650	750	850

Centrando el estudio en la resistencia de contacto, se puede elegir un valor único para la resistencia de contacto, ya que esta contribuye primordialmente la epidermis y se sabe que experimenta fuertes variaciones según las diferentes partes del cuerpo y entre diversos individuos. Es afectada por la humedad, interna y externa y por lo tanto puede influir sobre ella condicionamientos fisiológicos y psicológicos que pueden ser relevantes cuando el flujo de corriente persiste por más de uno o dos segundos. El flujo de corriente por una herida o desgaste en la piel puede ser muy doloroso por cuanto es una zona de baja resistencia.

Figura 3.1
Impedancia total del cuerpo humano en función del voltaje y área de contacto



Diversas normas y publicaciones recomiendan un valor de 3000[Ohms] para la resistencia de contacto. Dalziel [1] sugiere un valor más bajo, de 1000[Ohms] fundamentados en resultados experimentales. El valor de 1000[Ohms] es recomendado por la norma IEC 60479-1:2000 versión [2]. En forma conservadora se puede considerar un valor de 1000[Ohms] para la resistencia de contacto.

$$(3.2)$$

En cuanto a las resistencias de contacto, se supone habitualmente nula la resistencia de contacto mano-conductor, mientras que la de pie y terreno es función de la resistividad equivalente ρ_{tierra} [Ohms -mt] del terreno, supuesto homogéneo:

$$R_p = 3 \rho \text{ [Ohms]} \quad (3.3)$$

Según Heppe [3], esta última expresión debe modificarse cuando existe una delgada capa superficial de alta resistividad ρ_s [Ohm-mt] y espesor h [mt], incorporando un factor de corrección "c":

$$R_p = 3 c_s \rho_s \text{ [Ohms]} \quad (3.4)$$

El factor c_s es función de h y del factor de reflexión: $K = (\rho - \rho_s) / (\rho + \rho_s)$

ρ_s [Ohm-mt] : resistividad de la capa superficial

ρ [Ohm-mt] : resistividad del terreno (primer estrato)

Puede obtenerse alternativamente de la Figura 3.2 o de la expresión analítica, con un error inferior al 5%.

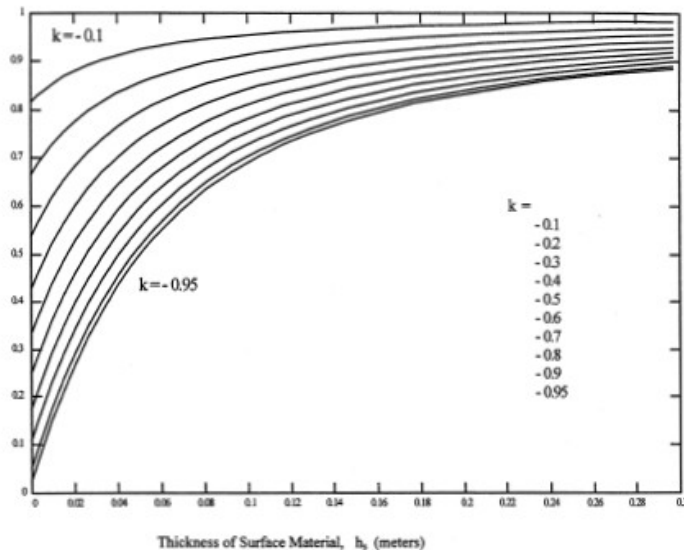


Figura 3.2. Factor de corrección c

La impedancia del cuerpo humano para corrientes transitorias de alta tensión es significativamente diferente de la impedancia a baja frecuencia. La componente resistiva es "shuntada" por una capacitancia, cuyo valor no es bien conocido, aunque se estima en algunas centenas de pF. Esta capacitancia juega un rol importante derivando una porción relevante de la corriente, que no alcanza a atravesar la piel. No obstante, hasta no disponer de mejor información, es prudente adoptar valores de impedancia similares a los de régimen permanente.

3.2. Efectos de circulación de corriente.

Los efectos del paso de corriente eléctrica a través de zonas vitales del cuerpo humano, dependen de la magnitud, duración y frecuencia de esta corriente.

Los más comunes efectos fisiológicos provocados por el flujo de corriente de frecuencia industrial con una duración de uno a tres segundos, según su magnitud, se describen en la Tabla 3.2.

TABLA 3.2. Efectos fisiológicos de paso de corriente por el cuerpo humano.

mA	Efectos fisiológicos
0,4 - 1,2	umbral de percepción: detección de leve sensación de cosquilleo.
1,2 - 6	corrientes de reacción: sensibles pero no inhabilitan el control muscular.
6 - 9	umbral de contracciones musculares involuntarias.
9 - 25	incapacidad para desligarse; dificultad para respirar; contracciones musculares violentas.
26 - 50	paralización de la respiración.
51 - 100	umbral de fibrilación ventricular.
sobre 100	cesa circulación sanguínea; hidrólisis de la sangre.

Umbral de percepción.

El umbral o límite inferior de percepción es el mínimo valor de corriente eléctrica, aplicada entre ambas manos, que es "percibido" por el ser humano. Este límite es muy variable de una persona a otra, determinándose un valor medio a corrientes industriales (50 - 60 Hz) de aproximadamente 1,1 mA para el sexo masculino y 0,7 mA para el sexo femenino.

Umbral de contracción muscular.

El nivel de contracción muscular es el mínimo valor de corriente para el cual se hace imposible o difícil soltar de las manos el objeto energizado que ocasiona la circulación de corriente por el cuerpo humano. La razón de esto es que la corriente eléctrica puede excitar directamente los nervios y músculos, contrayéndolos permanentemente.

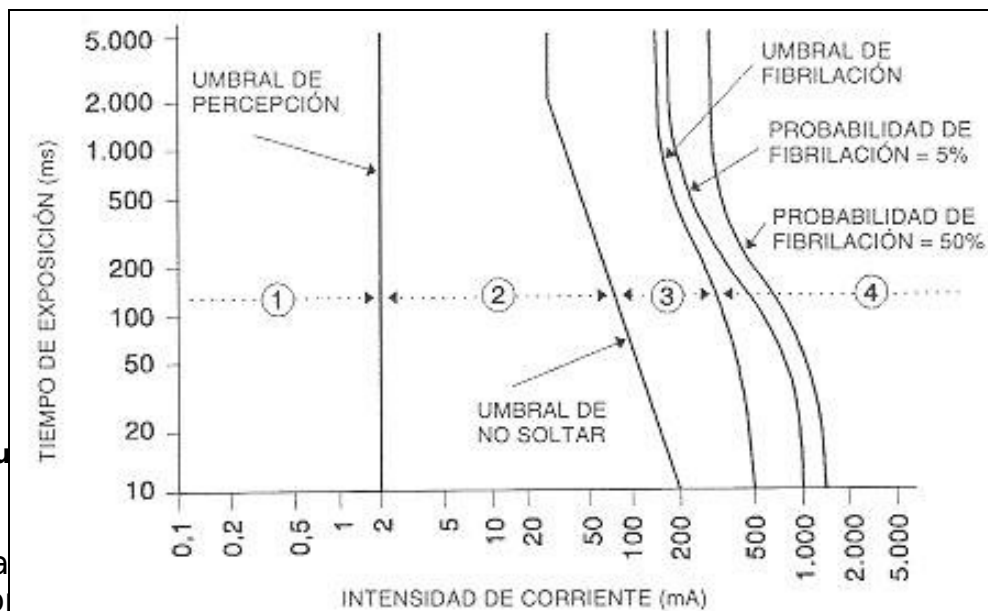
Límite de fibrilación ventricular.

En condiciones normales, los dos ventrículos del corazón funcionan coordinadamente para bombear la sangre por el cuerpo y pulmones. Una corriente eléctrica de suficiente magnitud, pasando a través del corazón, puede afectar las paredes musculosas de los ventrículos y ocasionar un funcionamiento irregular y des-coordinado de éstos.

Este fenómeno se conoce como "fibrilación ventricular" y la restitución a la condición normal (des-fibrilación) sólo es posible en un tiempo corto y con medios no disponibles habitualmente fuera de los hospitales.

En función del tiempo, los valores anteriores se modifican como indica la siguiente Figura

Figura 3.3
Media hombre



estableció que el valor efectivo de la máxima corriente tolerable que no produce fibrilación ventricular, I_B , es función de la energía absorbida por el cuerpo y responde a la ecuación:

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (3.5)$$

donde K es una constante empírica relacionada con la energía absorbida en el "shock" por el $X\%$ de una población. En experimentos a frecuencia industrial, se determinó que para $X = 99,5\%$, la constante K valía 0,116 para individuos de 50 Kg y 0,157 para individuos de 70 Kg.

A diferencia de los niveles anteriores, se tiene poco conocimiento del efecto de la frecuencia sobre las corrientes de fibrilación, salvo el hecho seguro de su incremento con la frecuencia. Dalziel concluye que el criterio de energía $I^2t = \text{constante}$, es aplicable para corrientes de impulso. Por otra parte, es importante destacar que corrientes de magnitud inferior a las corrientes de percepción, pueden producir electrocución si son aplicadas directamente al corazón; son del orden de micro Amperes y se denominan corrientes de "micro-shock" para distinguirlas de aquellas aplicadas al exterior del cuerpo humano.

3.4. Diferencias de potencial en puestas a tierra.

En condiciones normales, el electrodo de tierra de una instalación eléctrica se encuentra al mismo potencial del terreno y ambos igualan el

potencial de la tierra remota. Durante una falla, desequilibrio en el sistema de potencia, descarga atmosférica u otra anomalía similar, una corriente fluye por el electrodo desde o hacia el terreno, estableciendo un potencial para el electrodo de tierra y una distribución de potencial en el terreno, en particular sobre la superficie. Esta elevación de potencial es proporcional a la magnitud de la corriente disipada a tierra y a la resistencia del electrodo de puesta a tierra.

La Figura 3.4 muestra cuatro situaciones básicas que implican riesgo para una persona durante la circulación de una corriente intensa. Cada una de estas situaciones define un voltaje aplicado al individuo, según su acción y ubicación relativa a la disposición de los conductores de la puesta a tierra:

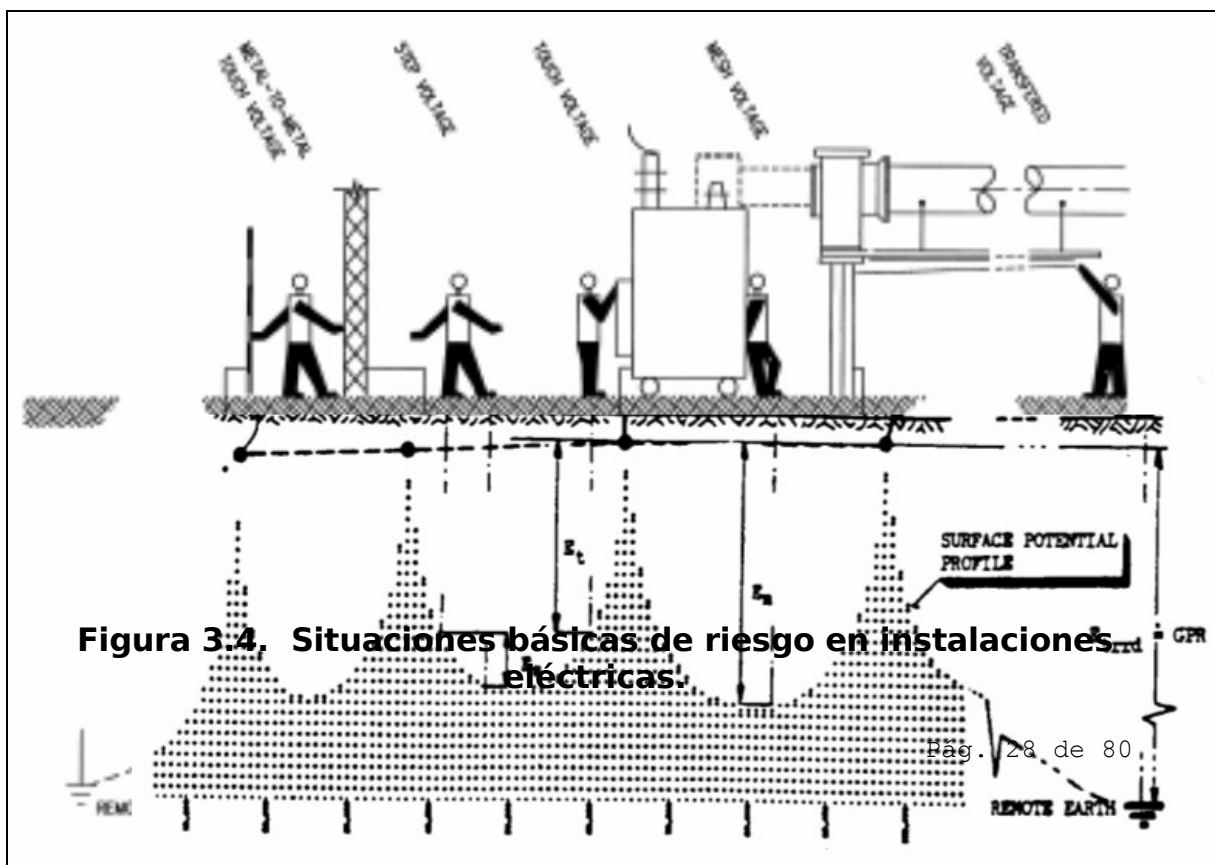
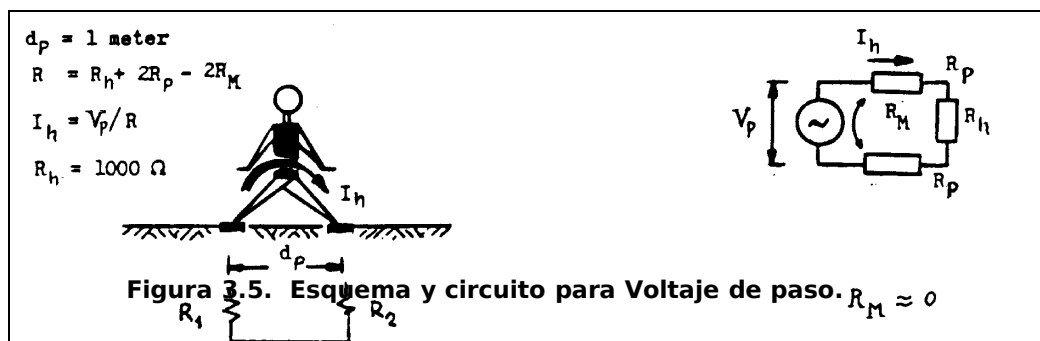


Figura 3.4. Situaciones básicas de riesgo en instalaciones eléctricas.

Voltaje de paso (Step Voltage): es la diferencia de potencial sobre la superficie del terreno entre dos puntos separados una distancia de un metro; esta diferencia de potencial quedaría aplicada entre ambos pies de una persona al dar un paso y sin estar en contacto con ningún objeto.

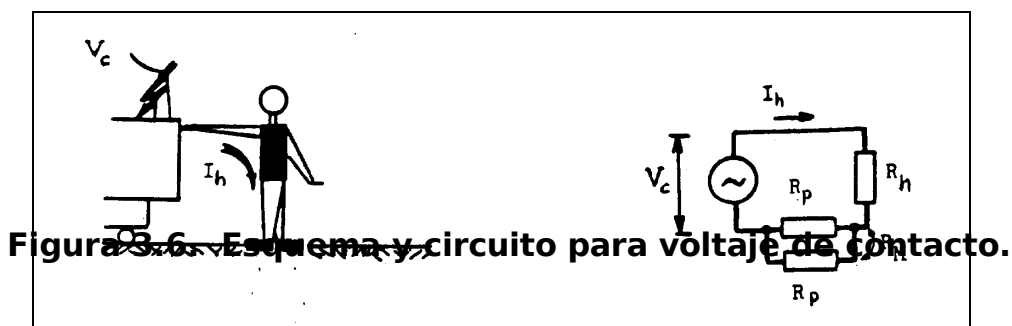


En la Figura 3.5 se indica el circuito aplicable a esta situación. Las resistencias R_0 , R_1 y R_2 son propias del terreno y en conjunto constituyen la resistencia de puesta a tierra. La derivación está formada por la conexión serie de la resistencia del cuerpo humano R_h y las resistencias de contacto pie-terreno. La corriente derivada I_h y el voltaje de paso aplicado se relacionan por:

$$V_p = (R_h + 2 R_p) I_h \quad (3.6)$$

La variación de potencial en la superficie, para una magnitud de corriente de falla definida, es fuertemente dependiente de la proximidad de los conductores de la malla de tierra. Por consiguiente, la mayor variación se experimentará en las zonas de retículo grande y fundamentalmente en la periferia de la malla.

b) Voltaje de contacto (Touch Voltage): es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y un punto de conexión a la puesta a tierra; esta diferencia de potencial quedaría aplicada entre una mano y los pies de una persona que se pone en contacto indirecto.



En este caso, la derivación comprende la conexión paralelo de las resistencias de contacto pie-terreno; el voltaje de contacto aplicado al individuo es:

$$V_c = (R_h + R_p/2) I_h$$

(3.7)

c) Voltaje de retículo (Mesh voltage): corresponde a la situación extrema de voltaje de contacto dentro del perímetro de la malla y recibe tal denominación por el hecho de encontrarse habitualmente cerca del centro de un retículo.

d) Voltaje transferido (Transferred voltage): es la diferencia de potencial con respecto a la tierra remota de conductores ubicados en puntos distantes de una puesta a tierra, pero conectados eléctricamente a ella o enterrados en sus proximidades y que recogen parte de la corriente de falla que fluye en el terreno y la conducen a lugares apartados; esta diferencia de potencial queda aplicada entre una mano y los pies de una persona que se pone en contacto directo con el conductor en un punto remoto. Corresponde por lo tanto a un caso especial de voltaje de contacto, con el riesgo de que la persona quede sometida prácticamente al potencial máximo que adquiere la malla con respecto a la tierra remota, si existe conexión eléctrica entre la malla y el conductor.

Es importante por lo tanto evitar la conexión eléctrica de una malla de tierra con cualquier conductor que se extienda fuera del perímetro de la malla; no obstante, potenciales de menor magnitud pueden transferirse por elementos conductores como cañerías de agua, vías férreas u otros que pasen cerca de la malla. Deberán usarse uniones o recubrimientos aislantes en este segundo caso.

En atención al comportamiento del cuerpo humano frente al paso de corriente y a los efectos que ésta produce, todo proyecto de puesta a tierra debe incluir un estudio de la magnitud de los voltajes de paso, contacto, y aquellos eventualmente transferidos fuera de la instalación.

3.5 Voltajes tolerables por el cuerpo humano.

Establecidos los valores de resistencia del cuerpo humano y máxima corriente tolerable, la Standard N° 80 de IEEE [2] define en función de ellas la máxima diferencia de potencial a que puede ser sometido el cuerpo humano, en base a los posibles puntos de contacto. Ocupando (3.2), (3.4) y (3.5) para un individuo de 50 Kg y sustituyendo en (3.6) y (3.7) se obtiene respectivamente los siguientes límites:

a) Máximo voltaje de paso permisible:

$$V_p = \frac{116 + 0.696 \ c \ \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ Volts} \quad (3.8)$$

b) Máximo voltaje de contacto permisible

$$V_c = \frac{116 + 0.174 \ c \ \rho_s}{\sqrt{t}} \text{ Volts} \quad (3.9)$$

en donde :

ρ_s : resistividad de la capa superficial [Ohm-mt]

t : tiempo global de exposición [seg]

c : factor de corrección debido a la presencia de la capa resistiva; en la práctica se estima $c=1$

Consideración de corrientes de larga duración

Los límites anteriores se han establecido ocupando la ley de Dalziel, definida por la relación (3.5), por lo tanto, con la restricción de tiempos de duración entre 0.03 y 3 segundos y corriente máxima bajo el nivel de fibrilación ventricular. Sin embargo, en una instalación eléctrica pueden existir corrientes residuales de valores inferiores al ajuste mínimo de detección de las protecciones de corriente residual, las cuales pueden estar presentes durante largos lapsos de tiempo.

De este modo, para los valores de resistencia del cuerpo humano y de contacto entre pie y terreno aceptados y un límite de 9 mA de corriente de "let-go", el límite máximo admisible de tensión de contacto de larga duración es:

$$V_c = 9 + 0.0135 \ c \ \rho_s \text{ [volts]} \quad (3.10)$$

Para corrientes de este último tipo, el límite de tensión de paso es menos exigente que el de tensión de contacto. De (3.9) y (3.10) se deduce que el cruce se presenta para un tiempo global de exposición de 3,6 segundos.

Los máximos valores de tensión a los cuales puede quedar sometido el cuerpo humano sin ningún riesgo, en forma permanente, son 50 Volts en lugares secos y 24 Volts en lugares húmedos o mojados en general.

3.6 Resistividad superficial del terreno

Los valores tolerables de voltaje entre pies y entre mano y pies, dependen en gran medida del valor de resistividad de la parte superior del terreno que cubre la puesta a tierra. Esta resistividad determina la

resistencia de contacto de los pies con el terreno.

Una forma usada comúnmente para lograr valores tolerables altos, es aumentar artificialmente la resistividad superficial del área abarcada por la puesta a tierra mediante el empleo de una capa de grava limpia, de un tamaño medio de 1/2" y un espesor de 10 a 15 cm. Para esta grava se supone normalmente una resistividad de 3.000 [Ohm-m], con lo cual los valores de voltaje entre pies y entre mano y pies tolerables, son 2.216 y 626 Volts durante 1 seg. El empleo de esta capa de grava presenta las siguientes ventajas: por un lado, el aumento de los valores tolerables de voltajes, conduce a exigencias menores en el dimensionamiento de la toma de tierra en cuanto a superficie abarcada y cantidad de conductor a emplear; y, por otro lado, los valores de $V_{pp\ tol}$ y $V_{mp\ tol}$ se mantienen con poca variación a lo largo del año, no siendo influidos por las variaciones estacionales (humedad en invierno y sequía en verano), que hacen variar fuertemente la resistividad de la zona superior de los terrenos naturales.

La IEEE Standard 80-2000 incorpora la siguiente información respecto de las características de los materiales empleados usualmente en esta capa superficial:

Tabla 3.3 Resistividades de materiales superficiales

Number	Description of surface material (U.S. state where found)	Resistivity of sample $\Omega\cdot m$	
		Dry	Wet
1	Crusher run granite with fines (N.C.)	140×10^6	1300 (ground water, 45 $\Omega\cdot m$)
2	1.5 in (0.04 m) crusher run granite (Ga.) with fines	4000	1200 (rain water, 100 W)
3	0.75–1 in (0.02–0.025 m) granite (Calif.) with fines	—	6513 (10 min after 45 $\Omega\cdot m$ water drained)
4	#4 (1–2 in) (0.025–0.05 m) washed granite (Ga.)	1.5×10^6 to 4.5×10^6	5000 (rain water, 100 $\Omega\cdot m$)
5	#3 (2–4 in) (0.05–0.1 m) washed granite (Ga.)	2.6×10^6 to 3×10^6	10 000 (Rain water, 100 $\Omega\cdot m$)
6	Size unknown, washed limestone (Mich.)	7×10^6	2000–3000 (ground water, 45 $\Omega\cdot m$)
7	Washed granite, similar to 0.75 in (0.02 m) gravel	2×10^6	10 000
8	Washed granite, similar to pea gravel	40×10^6	5000
9	#57 (0.75 in) (0.02 m) washed granite (N.C.)	190×10^6	8000 (ground water, 45 $\Omega\cdot m$)
10	Asphalt	2×10^6 to 30×10^6	10 000 to 6×10^6
11	Concrete	1×10^6 to 1×10^9 ^a	21 to 100

^aOven dried concrete (Hammond and Robson [B78]). Values for air-cured concrete can be much lower due to moisture content.

REFERENCIAS

- [1] C.F. Dalziel : "Electric shock hazard". *IEEE Spectrum*, February, 1972, pp. 41-50.
- [2] IEEE Standard 80-2000 : "Guide for Safety in A.C. Substation Grounding "
- [3] R. J. Heppe: "Step potentials and Body currents for near grounds in two-layer earth". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, N° 1, Jan-Feb, 1979, pp. 45-59.
- [4] J. Cabanes, W. R. Lee, H. Antoni : "Effecto Physiologique de l'Electricite sur L'Homme".

Revue Generale de l'Electricité, N° 10, Octobre 1981.

[5] V. E. Lerrick, V. Ya, Gendin: "The Electro-Insulating Properties of Concrete". Elektrichestvo, N° 11, 1968.

[6] P. G. Laurent : "Guide sur calcul, l'execution et la mesure des prises de terre". Revue Generale de l'Electricité, N° 9, Septembre, 1972.

[7] Bridges J.E. et all : "Electrical Shock Safety Criteria", Pergamon Press, 1985

[8] Nch Elec. 4/2003 Electricidad. Instalaciones de Consumo en Baja Tensión

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE PUESTAS A TIERRA

Introducción

Para verificar el grado de seguridad otorgado por un electrodo de tierra, en cuanto al cumplimiento de los valores límites de voltaje permitidos, es indispensable evaluar potenciales y gradientes en las vecindades de la toma de tierra, provocados por la circulación de corriente en el terreno. La elevación de potencial propia del electrodo, en razón a la magnitud de

corriente que disipa, permitirá conocer su resistencia de puesta a tierra.

La mayoría de los procedimientos de análisis y diseño de puestas a tierra, están basados en la suposición de terreno homogéneo o a lo sumo, considerando la existencia de un estrato superior de espesor finito, seguido de un medio semi-infinito de distinta resistividad. Lo anterior necesariamente conduce a reducir el modelo de terreno estratificado general a un modelo práctico de terreno homogéneo equivalente, caracterizado por un sólo parámetro, la resistividad equivalente ρ_e ; o bien, con una mayor aproximación, un terreno con dos medios y caracterizado por tres parámetros: la resistividad equivalente del estrato superior ρ_1 , su espesor H y la resistividad equivalente del medio inferior ρ_2 .

4.1. Procedimiento de reducción de Burgsdorf-Yakobs para cálculo de Resistividad equivalente del terreno

En el método de reducción propuesto por Yakobs, se obtienen las siguientes expresiones para la reducción de un terreno de n capas, similar al mostrado en la Figura 4.1.

Superficie del suelo

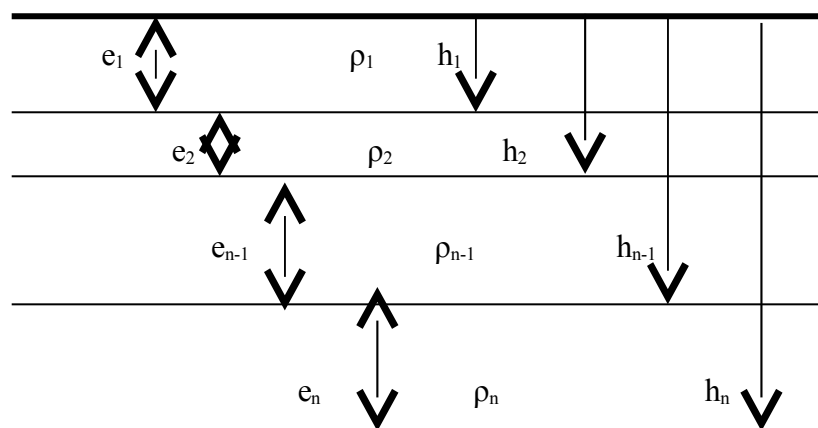


Figura 4.1 Terreno multi-estratificado

ρ_i : Resistividad del estrato "i", supuesto uniforme, en Ohm- metro

h_i : Profundidad desde la superficie al término del estrato "i", en metros

S : Area que cubre el perímetro del electrodo de tierra, en metros cuadrados

- b : Máxima profundidad de conductor enterrado, medida desde la superficie, en metros; incluye la profundidad de enterramiento de la malla y de las barras verticales si es el caso.

Se debe calcular las constantes:

$$r = \sqrt{S/\pi}$$

$$r_0^2 = r^2 - b^2$$

$$q_0^2 = 2r(r + b) \quad (4.1)$$

Y las variables ($i = 1, 2, \dots$ hasta el número de capas)

$$u_i^2 = q_0^2 + r_0^2 + h_i^2$$

$$v_i^2 = 0.5 [u_i^2 - \sqrt{u_i^4 - 4 q_0^2 r_0^2}]$$

$$F_i = \sqrt{1 - v_i^2 / r_0^2} \quad (4.2)$$

Cuando todas las capas desde la superficie, hasta la capa n , se reducen a una sola equivalente :

$$\rho_{eq}(1 \rightarrow n) = \frac{F_n}{\sum_{i=1}^n (F_i - F_{i-1}) / \rho_i} \quad (4.3)$$

con: $F_0 = 0$ y $F_n = 1$

La programación de las ecuaciones anteriores es fácil y directa y constituye un método rápido para evaluar el modelo equivalente con computador o calculadoras manuales.

4.2 Análisis de electrodos de tierra elementales.

Un electrodo elemental corresponde a una barra o conductor simple, enterrado vertical u horizontalmente, en general con el principal objetivo de establecer una conexión conductora a tierra de un determinado valor de resistencia; se emplean cuando las corrientes disipadas a tierra son de baja magnitud relativa y el terreno presenta un bajo valor de resistividad equivalente, en cuyo caso la exigencia en el valor de resistencia de la puesta a tierra es fácil de satisfacer.

Se presentan en primer lugar las relaciones básicas para evaluar

potenciales y resistencia de electrodos en terreno homogéneo y se entrega posteriormente el procedimiento para generalizar a dos estratos.

4.2.1. Potenciales en la superficie del terreno cerca de electrodos elementales.

Se presentan a continuación las relaciones simplificadas para evaluar el potencial inducido sobre la superficie del terreno, a una distancia horizontal de x metros desde la posición del conductor, el cual se supone cilíndrico, de radio " a " metros, de una longitud efectiva enterrada " l " metros y difundiéndose al terreno una corriente total de " I " Amperes; el terreno se supone homogéneo con una resistividad uniforme " ρ " Ohm-metro.

a) Conductor enterrado verticalmente (barra), desde t metros de profundidad con respecto al nivel del suelo:

$$\phi(x) = \frac{\rho I}{2\pi l} \ln \frac{[(t+l) + \sqrt{(t+l)^2 + x^2}]}{[t + \sqrt{t^2 + x^2}]} \quad (4.4)$$

La elevación de potencial del conductor, útil para evaluar por diferencias las tensiones de contacto, es:

$$\phi_0 = \frac{\rho I}{4\pi l} \ln \frac{4l(l+2t)}{a(2t + \sqrt{4t^2 + a^2})} \quad (4.5)$$

c) Conductor enterrado horizontalmente, a una profundidad de h metros.

$$\phi(x) = \frac{\rho I}{2\pi l} \ln \frac{l/2 + \sqrt{(l/2)^2 + x^2 + h^2}}{-l/2 + \sqrt{(l/2)^2 + x^2 + h^2}} \quad (4.6)$$

En este caso, la variable x es distancia horizontal desde el conductor, sobre la superficie del suelo. La elevación de potencial del conductor es:

$$\phi_0 = \frac{\rho I}{2\pi l} [\ln (2l^2 / ah) - 2] \quad (4.7)$$

Las expresiones de potencial para otros tipos de electrodos son bastante más complejas y pueden consultarse en la literatura [1].

4.2.2 Resistencia de puesta a tierra de electrodos elementales

A continuación, se entregan las expresiones analíticas correspondientes a la resistencia de puesta a tierra de algunos electrodos de uso frecuente, supuestamente ubicados en un terreno de resistividad ρ [Ohm-m]. Según

las suposiciones o aproximaciones efectuadas por diversos autores, algunas de las configuraciones presentan más de una expresión con muy poca diferencia en el valor final.

a) Semiesfera de radio a [m], con la sección en la superficie del suelo:

$$(4.8) \quad R = \frac{\rho}{2\pi a} \quad [\text{Ohm}]$$

b) Barra vertical de radio a [m] y longitud l [m] enterrada desde una profundidad de t [m]:

$$R = \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{4l^2 + 8t}{a(2t + \sqrt{4t^2 + a^2})} \quad [\text{Ohm}] \quad (4.9)$$

c) Conductor cilíndrico horizontal de radio a [m] y longitud l [m]:

- enterrado a una profundidad de h [m], con $h < l$

$$(4.10) \quad R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l^2}{ah} - 2 + \frac{h}{l} - \frac{h^2}{l^2} + \frac{h^4}{2l^4} \dots \right] \quad [\text{Ohm}]$$

4.2.3 Expresiones para terrenos no-homogéneos.

Por ejemplo, la resistencia del electrodo vertical de la Figura 4.2, queda:

$$(4.11) \quad R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{[(H-l)(l+a)]}{[Ha]} + \frac{\rho_1 \rho_2}{2\pi H(\rho_2 - \rho_1)} \ln \left[1 + \frac{H(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_1(H-l)} \right]$$

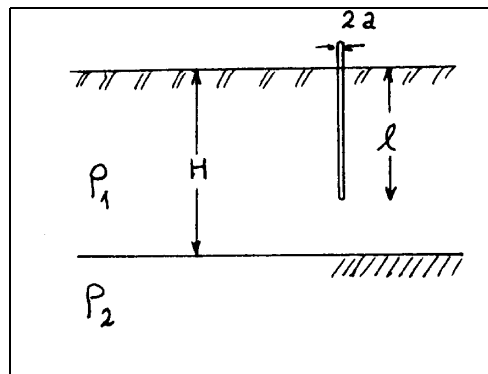


Figura 4.2: Electrodo elemental en terreno estratificado.

4.3. Análisis de electrodos de tierra compuestos.

Los electrodos compuestos consisten en combinaciones sencillas y simétricas de electrodos elementales, introduciendo por lo tanto un grado más de complejidad.

4.3.1 Resistencia de puesta a tierra de electrodos compuestos

Expresiones generales de resistencia de puesta a tierra para una serie de configuraciones típicas, considerando terreno homogéneo, puede encontrarse en las referencias [1], [2], [3], [4] y [9]. Osion [11] encontró que la resistencia de puesta a tierra de varias configuraciones puede ser representada por la fórmula general:

$$(4.12) \quad R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{KL^2}{2ah}$$

donde cada configuración queda caracterizada por un valor específico del parámetro K y del parámetro L, tal como se muestra en la Tabla 4.1.

<u>Tipo configuración</u>	<u>L</u>	<u>K</u>	<u>Aproximación</u>
Conductor horizontal	l	1	$l^2 + s^2$

a)	Dos conductores horizontales paralelos separados una distancia s	$2 l$	$\frac{1}{4s^2}$	$2 h \ll s$
c)	Dos conductores horizontales en ángulo recto	$2 l$	1,46	
d)	Estrella horizontal de tres brazos	$3 l$	2,39	
e)	Estrella horizontal de cuatro brazos	$4 l$	8,49	
f)	Estrella horizontal de seis brazos	$6 l$	192	
g)	Cuadrado de lado l	$4 l$	4,25	$2 h \ll l$
h)	Rectángulo de lados l_1 y l_2	$2(l_1 + l_2)$	5,81 6,42 8,17	$l_1 = 1,5 l_2$ $l_1 = 2,0 l_2$ $l_1 = 3,0 l_2$

Tabla 4.1: Parámetros L y K de fórmula general

4.4. Análisis de mallas de tierra.

En sistemas donde la corriente de falla a tierra sea muy elevada, se necesitará electrodos más complejos para asegurar una resistencia a tierra baja, tal que la elevación de potencial de la puesta a tierra no represente valores peligrosos. El problema se resuelve aumentando la longitud de conductor enterrado y aumentando el área que cubre el electrodo de tierra.

Definida una geometría de la malla, deberá procederse a evaluar su comportamiento eléctrico en interacción con el terreno en lo que respecta a la resistencia de puesta a tierra y a la distribución de potenciales en la superficie del terreno, sobre la malla y en su vecindad. Para este efecto existen diversos métodos de análisis, los cuales pueden clasificarse en: Métodos generales y Métodos simplificados.

a) Métodos generales

Los métodos generales son aplicables a una malla de tierra de cualquier configuración. El procedimiento básico común consiste en segmentar la malla de tierra en un conjunto de electrodos elementales, cuyas expresiones analíticas generales, ya sea de potencial o resistencia, sean conocidas. La magnitud relativa de los electrodos elementales resultantes de la partición distingue los métodos para cálculo de resistencia y potenciales.

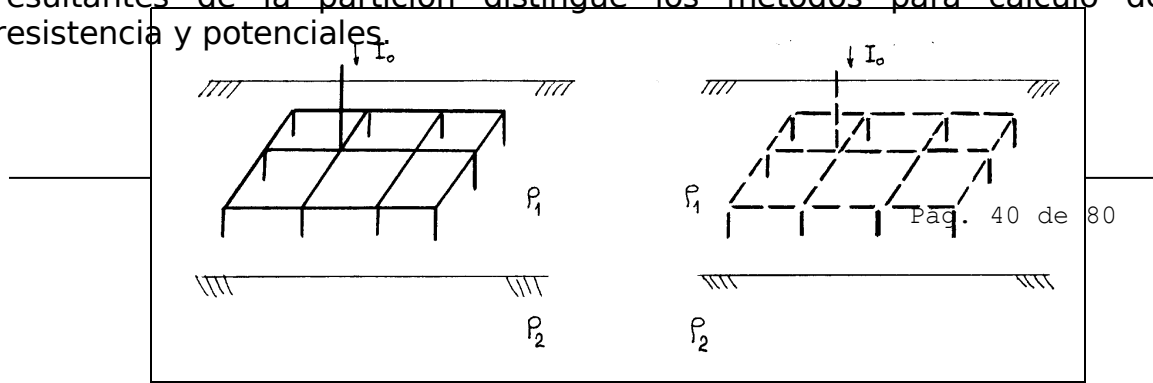


Figura 4.3 Modelo discreto de malla de tierra

La evaluación de resistencia de puesta a tierra no requiere mayor detalle que considerar como electrodo elemental la porción de conductor entre dos conexiones sucesivas dentro de la malla, o aún, si se dispone de las expresiones respectivas, una partición más gruesa en electrodos compuestos.

La evaluación de potenciales por el contrario, aumenta su precisión mientras más fina es la partición, haciéndose necesaria la subdivisión de cada conductor de la malla en un mayor número de electrodos elementales cilíndricos. Esto se traduce en la generación de un sistema de ecuaciones de orden elevado, cuya solución es indispensable para el cálculo posterior de voltajes en torno a la malla y debe obtenerse con apoyo computacional.

La distribución de corrientes por los conductores de la malla determina los potenciales en su entorno, en particular sobre la superficie del terreno, y éstos a su vez determinan las dimensiones del reticulado, por exigencias en cuanto a valores límites de potencial. Interesa por consiguiente conocer en el grado más exacto posible la distribución real de corrientes, que en general no es uniforme en cada conductor.

b) Métodos aproximados

Existe en la literatura numerosos procedimientos y expresiones propuestas por diversos autores para efectuar el análisis de mallas de tierra; sin embargo, el procedimiento de uso más frecuente, por el respaldo que significa la institución que lo propone, es el recomendado en la Standard N° 80 del IEEE. La última versión del año 2000 de este reglamento modificó significativamente el procedimiento y las expresiones utilizadas en versiones anteriores del mismo reglamento para el cálculo de los voltajes generados por una malla cuando difunde corriente al terreno. En lo que sigue se entrega el procedimiento y las expresiones.

4.4.1 Método IEEE para cálculo de potenciales.

En el caso de mallas de tierra con muchos conductores y en terrenos cualquiera, se ha deducido fórmulas matemáticas aproximadas para el cálculo de voltajes de paso y contacto en la superficie del terreno, las cuales se desarrollan tratando de llevar el problema real a un caso más simple de resolver, en especial considerando suelo homogéneo de

resistividad uniforme y adoptando factores empíricos para corregir el modelo.

Se estudia la distribución de potencial y gradiente en una disposición consistente en n conductores paralelos, de diámetro d , enterrados horizontalmente a una profundidad h , uniforme para todos los conductores. La disposición se idealiza considerando las siguientes suposiciones:

- la separación entre conductores D es mucho mayor que la profundidad de enterramiento h , y ésta a su vez muy superior al diámetro del conductor d .
-

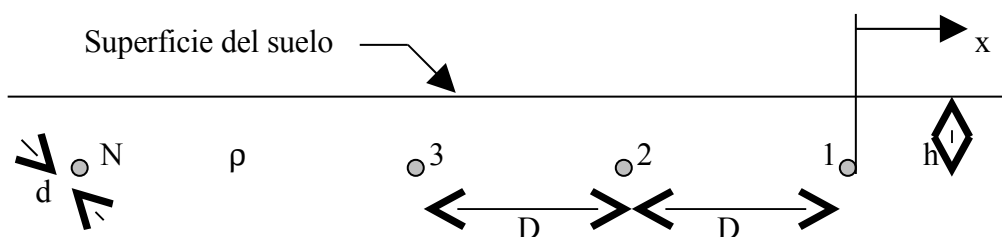


Figura 4.4: Disposición idealizada de conductores.

- La caída de potencial en el interior del reticulado (es decir en los conductores) es despreciable comparada con la caída de potencial en el terreno; esto implica que el potencial absoluto de todos los puntos de la malla se supone idéntico.
- La corriente en cada conductor fluirá radialmente en todas direcciones y en ángulo recto con respecto al conductor; por lo tanto las superficies equipotenciales próximas a cada conductor serán cilindros y el gradiente será inversamente proporcional a " r ".
- Es aplicable el principio de superposición; eso es, la magnitud y dirección de la componente de corriente en cualquier punto del terreno debido a cualquier conductor real o imagen puede determinarse separadamente y luego tales componentes pueden sumarse vectorialmente para dar la magnitud y dirección de la corriente total real en el punto.

La corriente entregada a tierra por los conductores no es uniforme en toda su extensión: es mayor en los vértices y menor en el centro de los conductores. La Standard N° 80 [3] recomienda aplicar un factor de corrección adecuado para propósitos prácticos:

$$K_i = 0,644 + 0,148 n \quad (4.13)$$

donde n es el número efectivo de conductores paralelos en un reticulado rectangular equivalente y esta definido por:

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (4.14)$$

donde:

$$n_a = 2 L_c / L_p \quad (4.15)$$

L_c = longitud total de conductor en el reticulado horizontal, en m

L_p = longitud del perímetro del reticulado, en m

$$n_b = 1 \text{ para mallas cuadradas, o bien: } n_b = (L_p / 4 / \sqrt{A})^{1/2} \quad (4.16)$$

A = área de la malla, en m²

$n_c = 1$ para mallas cuadradas y rectangulares, o bien:

$$n_c = (L_x \cdot L_y / A)^{0,7 \cdot A / (L_x \cdot L_y)} \quad (4.17)$$

$$n_d = D_m / (L_x^2 + L_y^2)^{1/2} \quad (4.18)$$

D_m = máxima distancia entre dos puntos cualquiera de la malla, en m

L_x = máxima longitud de la malla en la dirección x, en m

L_y = máxima longitud de la malla en la dirección y, en m

Este factor de corrección afecta las relaciones de voltajes de paso, contacto y retículo.

A continuación se incluyen las expresiones para voltajes de paso y contacto según la IEEE Standard 80 - 2000, aplicables a una malla real de conductores horizontales y verticales con una corriente total I_G difundida al terreno.

La longitud total de conductor enterrado a considerar en las expresiones depende de la geometría de la malla:

- para mallas sin barras, o sólo con unas pocas barras dispersas a través de la malla pero no ubicadas en las esquinas o a lo largo del perímetro de la malla:

$$L_M = L_C + L_R \quad (4.19)$$

Donde : L_R = longitud total de todas las barras, en m
 L_C = longitud total de conductor en el reticulado horizontal, en m

- para mallas con barras en las esquinas y también en el perímetro y en el interior de la malla, la longitud efectiva de conductor enterrado es:

$$L_M = L_C + (1,55 + 1,22 \cdot [L_r / (L_x^2 + L_y^2)^{1/2}]) \cdot L_R \quad (4.20)$$

Donde: L_r = longitud de cada una de las barras, en m

a) Voltaje de paso o voltaje pie-pie, V_p

Por definición de voltaje de paso, interesa determinar la magnitud y ubicación del punto de máxima gradiente sobre la superficie del terreno. Esta condición se cumple aproximadamente en el punto de la superficie sobre el conductor periférico. La expresión propuesta es:

$$V_p = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (4.21)$$

Donde:

$$L_s = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (4.22)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left| \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right| \quad (4.23)$$

b) Voltaje de contacto o mano-pie máximo, o voltaje de retículo, V_m

El voltaje de contacto o mano-pie corresponde a la diferencia existente entre el potencial que adquiere la malla y el potencial de un punto sobre la superficie del terreno. Este voltaje es variable dentro del perímetro de la malla, menor en puntos ubicados sobre la proyección de los conductores y mayor en los centros de los retículos. Para propósitos de diseño práctico, se utiliza como valor de referencia una estimación del máximo de esta función, definida también como voltaje de retículo.

El voltaje de retículo es la máxima diferencia de potencial, en Volts, entre el conductor de la malla y un punto en la superficie, ubicado sobre el centro de un retículo. En una malla con varios retículos, esta diferencia de potencial tiende a ser mayor en los retículos periféricos.

$$V_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (4.24)$$

donde

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left| \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right| + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left| \frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot n - 1)} \right| \right] \quad (4.25)$$

el factor K_{ii} vale :

- para mallas con barras a lo largo del perímetro, o para mallas con barras en sus esquinas, y también cuando la malla tiene barras en el perímetro y en su interior:

$$K_{ii} = 1$$

- para mallas sin barras o sólo con unas pocas barras, ninguna localizada en las esquinas o en el perímetro:

$$K_{ii} = 1 / (2 \cdot n)^{(2/n)} \quad (4.26)$$

$$K_h = (1 + h / h_0)^{-1/2} \quad (4.27)$$

$h_0 = 1$ m (profundidad de malla de referencia)

4.4.2 Métodos IEEE para cálculo de resistencia de puesta a tierra

a) Expresión de Laurent

Un método muy simple de cálculo de la resistencia de una malla de tierra sin barras verticales, es el propuesto por Laurent [3], quién usa una modificación de la expresión para el electrodo plano circular enterrado en terreno homogéneo, agregando un segundo término:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L_T} \quad [\text{Ohms}] \quad (4.28)$$

ρ = resistividad del terreno homogéneo equivalente [Ohm]

r = radio de un círculo plano, de igual área que la ocupada por la malla [m].

$$r = \sqrt{S / \pi}$$

S = área de la malla [m²]

L_T = longitud total de conductor enterrado [m]

Esta expresión se usa normalmente para obtener una primera aproximación del valor exacto de la resistencia, pero su simplicidad permite observar la influencia directa de algunos parámetros, de validez general, fuera del efecto ya conocido de la resistividad. En primer lugar, la resistencia de una malla de tierra se reduce al aumentar el área abarcada por el perímetro de la malla. Por otra parte, el segundo término reconoce el hecho de que la resistencia de la malla es mayor que la del círculo equivalente y que ésta diferencia decrece a medida que la

longitud de conductor enterrado aumenta. Expresado de otra forma, esta afirmación es equivalente a decir que la resistencia de una malla de tierra tendrá como cota inferior la resistencia de un electrodo plano circular de igual área.

b) Expresión de Sverak

Sverak expandió la expresión de Laurent, para tomar en cuenta la profundidad de la malla:

$$R = \rho \left\{ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{20/A}} \right) \right\} \quad [\text{Ohms}] \quad (4.29)$$

donde h = profundidad de la malla, en m

para mallas sin barras, esta expresión da un resultado prácticamente idéntico al obtenido mediante las siguientes expresiones propuestas por Schwarz.

c) Expresiones de Schwarz

Un procedimiento más complejo es propuesto por Schwarz [17], [3], para una malla formada por un reticulado y un conjunto de barras verticales; se determina en forma separada la resistencia del reticulado, R_1 , y de las barras, R_2 .

La resistencia del reticulado es:

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_c} \left(\ln \frac{2L_c}{Q_1} + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{S}} - K_2 \right) \quad [\text{Ohms}] \quad (4.30)$$

donde:

ρ = resistividad del terreno homogéneo equivalente, Ohms-m

L_c = longitud total de conductor del reticulado, m

$2a$ = diámetro del conductor, m

$$Q_1 = \begin{cases} a & \text{para conductor en la superficie} \\ \sqrt{2a} h & \text{para conductor enterrado} \end{cases}$$

La resistencia del conjunto de barras verticales es:

$$R_2 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot n_R \cdot L_R} \left[\ln \frac{4 L_R}{b} - 1 + \frac{2 K_1 \cdot L_r}{\sqrt{S}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (4.31)$$

donde:

L_r = longitud de cada barra, m

$2b$ = diámetro de cada barra, m

n_R = número de barras en el área de la malla.

En las expresiones anteriores, K_1 y K_2 son coeficientes que dependen de la configuración de la malla; originalmente, Schwarz los definió mediante gráficos y posteriormente Kercel propuso para ellos las siguientes expresiones:

$$K_1 = 1,43 - \frac{2,3 h}{\sqrt{S}} - 0,044 \frac{A}{B} \quad (4.32)$$

$$K_2 = 5,5 - \frac{8 h}{\sqrt{S}} + \left(0,15 - \frac{h}{\sqrt{S}} \right) \frac{A}{B} \quad (4.33)$$

donde:

h = profundidad de enterramiento del reticulado [m]

S = superficie cubierta por la malla [m²]

A = lado mayor del reticulado [m]

B = lado menor del reticulado [m]

La resistencia mutua entre el reticulado y el conjunto de barras es:

$$R_{12} = \frac{\rho}{\pi L_c} \left(L_n \frac{2L_c}{L_r} + \frac{K_1 \cdot L_c}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right) \quad [\text{Ohms}] \quad (4.34)$$

Finalmente, la resistencia combinada del conjunto se obtiene analizando la interconexión de barras y reticulado como un electrodo compuesto:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad (4.35)$$

En un terreno homogéneo, en general la resistencia combinada del reticulado y barras, es prácticamente igual a la resistencia del reticulado solo, no justificándose el uso de barras. Sólo se justifican éstas cuando penetran en una zona más conductiva que aquella que contiene al reticulado, o cuando es necesario reducir la sensibilidad de la resistencia a las condiciones climáticas, que afectan esencialmente al estrato superficial: pueden contribuir a mantener la resistencia de puesta a tierra dentro de un margen más estrecho de variación, en las diferentes épocas del año.

d) Expresiones de Schwarz para terreno estratificado.

Frente a la situación habitual de instalación de un electrodo que incluye barras en un terreno estratificado, en las últimas versiones de la Standard Nº 80 se recoge una modificación de la fórmula anterior, propuesta por

Naham y Salomón, para el caso en que el reticulado se encuentre situado en la capa superior de resistividad $\rho = \rho_i$ y profundidad H, y las barras alcanzan el medio inferior de resistividad

$$\rho = \rho_2$$

Siendo:

h : Profundidad del reticulado

A : lado mayor

L : longitud conductor reticulado

λ : longitud de barras

n : número barras

S : área del reticulado

B : lado menor

a : radio del conductor

b : radio barras

Se definen los coeficientes :

$$K_1 = \frac{\sqrt{S}}{2} \cdot 1,84 \left[\frac{1}{B} \ln \frac{B + \sqrt{A^2 + B^2}}{A} + \frac{1}{A} \ln \frac{A + \sqrt{A^2 + B^2}}{B} + \frac{B}{3A^2} + \frac{A}{3B^2} - \frac{(A^2 + B^2)^{3/2}}{3A^2 B^2} \right]$$

$$K_2 = \ln \frac{4(A+B)}{A} + 2K_1 \frac{A+B}{\sqrt{S}} - \ln \frac{B + \sqrt{B^2 + (A/2)^2}}{A/2} - \frac{1}{2} \ln \frac{(A/2) + \sqrt{B^2 + (A/2)^2}}{(-A/2) + \sqrt{B^2 + (A/2)^2}}$$

(4.36)

Y las siguientes expresiones:

Resistencia del reticulado:

$$R_1 = \frac{\rho_1}{\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L}{Q_1} \right) + K_1 \frac{L}{\sqrt{S}} - K_2 \right]$$

$$Q_1 = \left\{ \frac{a}{\sqrt{2ah}} \right.$$

(4.37)

Resistencia del conjunto de barras:

$$R_2 = \frac{\rho_a}{2\pi n \lambda} \left[\ln \frac{4\lambda}{b} - 1 + \frac{2K_1 \lambda}{\sqrt{S}} (\sqrt{n-1})^2 \right]$$

(4.38)

incorporándose una resistividad ponderada:

$$\rho_a = \frac{\lambda \rho_1 \rho_2}{\rho_2 H + \rho_1 (\lambda - H)}$$

(4.39)

Y finalmente, la Resistencia mutua entre reticulado y barras :

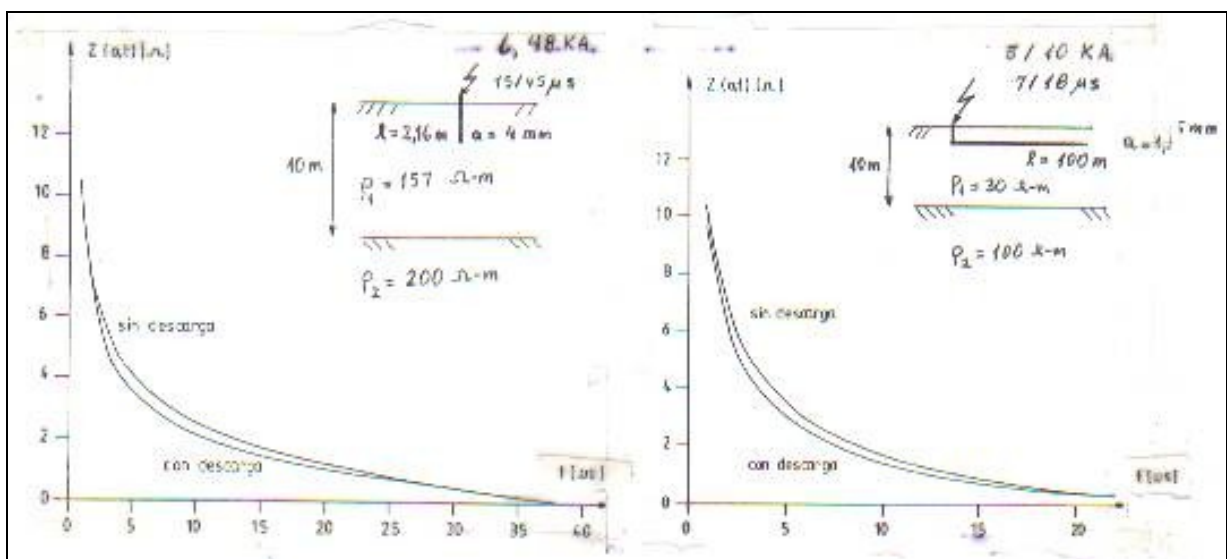
$$R_{12} = \frac{\rho_a}{\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L}{\lambda} \right) + K_1 \frac{L}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right] \quad (4.40)$$

4.4.3 Impedancia de impulso de una toma de tierra

El comportamiento de electrodos de tierra frente a descargas tipo atmosféricas, puede ser analizado considerando una modelación de parámetros uniformemente distribuidos, similar al de una línea de transmisión. Se considera que la resistencia metálica del electrodo es despreciable comparada con la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva es también despreciable comparada con la conductancia de fuga, dado que se puede considerar que la propagación de la corriente de impulso es preponderantemente de tipo conductivo.

En la referencia [21] se desarrolla un modelo matemático mediante el cual se puede analizar la respuesta dinámica de un electrodo simple extendido, en un terreno estratificado, y recorrido por una corriente de rayo. Su complejidad no permite plantear la impedancia mediante una expresión simple, sino que constituye un algoritmo computacional. La ruptura dieléctrica del terreno en torno al electrodo se considera suponiendo que la zona afectada cambia el valor de su resistividad según un modelo dinámico de comportamiento del terreno planteado por Liew [22], que considera los fenómenos de ionización y des-ionización.

Las siguientes Figuras reproducidas de la referencia [3] muestran el comportamiento de electrodos extendidos.



a) vertical
horizontal

b)

Figura 4.5 Impedancia de impulso de electrodos extendidos

Del análisis de electrodos extendidos, se puede extraer las siguientes conclusiones:

- Normalmente se producen desfases entre los máximos de tensión y corriente a lo largo del electrodo; este hecho se justifica por la presencia de componentes inductivas
- En terrenos de baja resistividad, se produce una rápida caída de tensión a lo largo del electrodo, en comparación con terrenos de alta resistividad; esto se debe principalmente a la importancia del término inductivo respecto del conductivo
- Se puede distinguir una longitud efectiva de disipación de la corriente, que es dependiente de la resistividad del terreno; una tabla de referencia es la siguiente:

ρ [KOhm-m]	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
L_{ef} [m]	10	20	30	40	60	80

En el caso de tomas de tierra más complejas, del tipo mallas, la información es muy reducida. Gupta y Thapar [23] proponen las siguientes fórmulas empíricas para la impedancia al impulso de mallas de tierra típicas de subestaciones:

$$Z = A R \quad (4.41)$$

con:

R : resistencia de puesta a tierra de la malla a frecuencia industrial
[Ohms]

$$r < r_e : \quad A = \exp \{ 0.333 (r/r_e)^{2.3} \}$$

$$r > r_e : \quad A = \exp \{ 0.333 \}$$

r = radio de la placa circular de igual área que la malla

r_e = radio de la placa circular de área efectiva al impulso

$$r_e = K \sqrt{\rho T}$$

$K = (1.45 - 0.05 s)$ para mallas impactadas en el centro

$K = (0.60 - 0.025 s)$ para mallas impactadas en esquina

s : espaciamiento entre conductores de la malla (uniforme)

ρ : resistividad del suelo [Ohm-m]

T : tiempo del frente de la onda de impulso [useg]

Verma y Mukhedkar [24] entregan expresiones para la impedancia al

impulso en función del tiempo, empleando un modelo de circuito para la malla:

- para onda de impulso idealizada (tipo rampa):

$$Z(t) = R + \frac{L}{t} + \frac{R^2 C}{t} (e^{-t/RC} - 1) \quad (4.42)$$

- para onda de impulso doble exponencial, de parámetros α y β

$$Z(t) = R + \frac{L}{t} [1 - (\alpha + \beta)t] \quad (4.43)$$

con :

R : resistencia de la malla a frecuencia industrial

C : capacitancia de la malla

$$C = \rho k \epsilon_0 / R$$

k : constante dieléctrica relativa del terreno (variable entre 4 y 70: 9 para suelo normalmente húmedo, 4 para suelo seco)

L : inductancia de la malla

- para un electrodo :

$$L = 0.21 L_n \frac{2l}{a} \quad [\mu H]$$

- para una malla cuadrada:

$$L = 0.21 \left[L_n \frac{2l}{a} + 0.69 \right] \quad [\mu H]$$

Una metodología general, basada en la segmentación de los conductores de la malla, puede encontrarse en [7] y [8].

REFERENCIAS

- [1] Sunde, E.: "Earth Conduction Effects in Transmission Systems". Dover, New York, 1968
- [2] Tagg, G.F.: "Earth Resistances". Ed. George Newnes, 1964.
- [3] IEEE : "Guide for safety in alternating-current substations Grounding". IEEE Standard 80, 2000.
- [4] IEEE : "Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems". IEEE Standard 142,.
- [5] Morales, N.: "Cálculo de resistencia de electrodos de tierra en terreno estratificado" Anales IX Congreso Ibero Latinoamericano sobre Métodos computacionales para Ingeniería, Córdoba, Argentina, Noviembre 1988
- [6] Dawalibi, F.; Mukhedkar, D.: "Resistance calculation of interconnected grounding electrodes". IEEE Trans. Vol. PAS 96, N° 1. Jan/Feb. 1977, pp. 59-65.
- [7] Dawalibi, F.; Mukhedkar, D.: "Influence of ground rods on grounding grids". IEEE Trans. Vol. PAS. 98, N° 6, Nov/Dec. 1979, pp. 2089-2018.
- [8] Morales, N., : "Proyecto y análisis de sistemas de puesta a tierra con apoyo de programas computacionales" Anales V Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, Universidad Católica de Valparaíso, Agosto 1983
- [9] Oslon A.B.: "Calculation of certain types of compound earthing devices". Electrichestvo N° 4, 1958, pp. 56-61.
- [10] Oslon A.B.: "Design of deep grounding rods for transmission Line towers". Electrichestvo N° 12, 1961, pp. 59-63.
- [11] Dawalibi, F.; Mukhedkar, D.: "Optimum Design of substation grounding in a two layer earth structure". Part I-II-II. IEEE Trans. Vol. PAS-94 N° 2, March/April 1975, pp. 252- 271.
- [12] Dawalibi, F.; Mukhedkar, D.: "Multi-step analysis of interconnected grounding electrodes". IEEE Trans. Vol. PAS-95, N° 1, Jan/Feb. 1976, pp. 113-119.
- [13] Dawalibi, F.; Mukhedkar, D.: "Transferred earth potentials in Power Systems". IEEE Trans. Vol. PAS-97, N° 1, Jan/Feb. 1978, pp. 90-101.
- [14] Kouteynikoff, P.: "Numerical computation of the grounding resistance of substations and towers". IEEE Trans, Vol. PAS-99 N° 3, May/Jun. 1980, pp. 957-965.

- [15] Nhman, I; Skuletich, S.: "Resistances to ground and mesh voltages of ground grids". Proc. IEE Vol. 126 N° 1, January 1979, pp. 57-61.
- [16] Laurent, P.: "Guide sur le calcul, l'exécution et la mesure des prises de terra". Rev. Gen. Electr. 1972, 81, pp. 455- 467.
- [17] Schwarz, S.: "Resistance of grounding systems". Transac. AIEE, 1954, 73, pp. 1010-1016.
- [18] CCITT : "Puesta a tierra de las instalaciones de telecomunicación" UIT, Ginebra, 1976
- [19] Mazzetti, C. and Vecca, G. "Impulse behaviour of ground electrodes" IEEE Trans. Vol. PAS-102, No. 9, September 1983
- [20] Velázquez, R. and Mukhedkar, D. "Analitical modelling of grounding electrodes transient behaviour" IEEE Trans. Vol. PAS-103, No. 6, June 1984
- [21] Zolezzi, J. y Morales, N." Modelo del comportamiento de electrodos de tierra extendidos frente a descargas tipo atmosféricas" Anales VII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Noviembre 1987
- [22] Liew, A. C. and Darveniza, M. "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths" Proc. IEEE, Vol. 121, No. 2, February 1974
- [23] Gupta, R and Thapar, B. : "Impulse impedance of grounding grids" IEEE Trans. Vol. PAS-99, No. 6, Nov/Dec 1980
- [24] Verma, R. and Mukhedkar, D. : "Fundamental considerations and impulse impedance of grounding grids " IEEE Trans. Vol. PAS-100, No. 3, March 1981
- [25] Papalexopoulos, A , Meliopoulos, A. : " Frecuency dependent characteristics of grounding systems" IEEE Trans. Vol. PWRD-2, No.4, October 1987
- [26] Morales, N. : " Modelo de circuito para análisis de mallas de tierra en alta frecuencia" Revista Electrotécnica Argentina, Enero/Febrero 1990

CAPITULO 5

CONSIDERACIONES PRACTICAS RESPECTO DE DISEÑO Y

CONSTRUCCION DE PUESTAS A TIERRA

5.1 Sistemas de distribución, colectores y conductores de tierra.

5.1.1 Sistemas de distribución

Por lo general, el sistema de distribución de tierra de una instalación eléctrica pertenece a uno de los tres tipos siguientes: en estrella, en malla o mixto.

Distribución en estrella

En esta disposición, los conductores de distribución de servicio y de protección siguen trayectos distintos entre los distintos puntos que deben ponerse a tierra. El principal argumento en favor de la configuración en estrella es que el riesgo de circulación de corrientes es reducido.

Este sistema se utiliza preferentemente en las instalaciones en las que las corrientes de retorno puedan circular a través de conductores comunes, con el consiguiente riesgo de crear perturbaciones. Este riesgo se puede presentar en los sistemas de distribución en malla.

Distribución en malla

La característica esencial de este sistema estriba en que los conductores de distribución de servicio y los de protección están conectados entre sí en varios puntos, formando una malla.

La configuración en malla tiene la ventaja de ampliar la sección transversal efectiva de los conductores de distribución en lo que respecta a las corrientes que derivan a tierra, de modo que éstas no provoquen caídas de tensión excesivas. Además, en caso de incidente, este método asegura la protección eficaz del personal

5.1.2 Colector de tierra

Su configuración geométrica ha de ser lo más sencilla posible, con el mínimo número de cambios de dirección: el espacio libre entre el colector y las paredes a las que se fije ha de ser tal que permita una fácil conexión, es decir, una distancia de 3 a 5 cm. La altura a la que ha de colocarse con respecto al suelo teniendo en cuenta los requisitos

anteriores y los obstáculos existentes en la sala, ha de ser tal que los mazos de conexión a los cables, tubería, etc. sean lo más cortos y rectos posible. En general esto conduce a colocar el colector a una altura de unos 60 cm sobre el suelo.

En los edificios de hormigón armado, hay que establecer conexiones entre el conductor en bucle y el armazón del edificio a distancias de 5 a 10 m.

5.1.3 Electrodo de tierra instalados en zanjas.

Estos electrodos consisten en conductores enterrados horizontalmente a una profundidad de por lo menos 60 cm. Tales electrodos hacen intervenir un gran volumen de terreno y, por consiguiente, la resistencia de una puesta a tierra instalada en una zanja es generalmente más reducida incluso si la capa superficial en que está enterrado el conductor tiene un bajo grado de humedad

5.1.4 Electrodo de barra introducidos verticalmente.

Las barras hincadas verticalmente en el suelo constituyen un tipo conveniente de electrodos de puesta a tierra y, de ser cortas, son relativamente fáciles de instalar y de un precio módico. Cuando se trata de barras cortas, es raro que una sola barra proporcione una resistencia suficientemente baja ; por consiguiente, conviene utilizar varias barras espaciadas.

Comparadas con otros tipos de electrodos de tierra, las barras tienen las ventajas siguientes:

- Exigen pequeñas excavaciones, por lo cual son más baratas desde el punto de vista de la mano de obra: si la capa superficial del terreno es arenosa y la capa freática está a gran profundidad, pueden introducirse hasta una profundidad tal que se reduzca mucho la resistencia de tierra
- Las posibilidades de variación de la resistencia de tierra debido a los cambios de temperaturas y de humedad son muchos menores en el caso de barras situadas a suficiente profundidad que en el de los electrodos enterrados cerca de la superficie
- La conexión entre una barra y el conductor al que esté asociada puede ser sencilla y muy fácil de inspeccionar y, en caso necesario, puede hacerse por encima del suelo, con lo que se evita el riesgo de corrosión cuando el electrodo y el conductor son de metales diferentes
- Si la refacción de la capa superior del suelo es costosa (por ejemplo, pavimentos de hormigón), conviene horadar esa capa e introducir barras en los agujeros hechos, con lo que se evitan las refacciones:

pueden emplearse también si el suelo está formado por rocas compactas, practicando un orificio con una perforadora.

5.2 Materiales para construcción de las tomas de tierra.

La construcción de una toma de tierra depende de un gran número de elementos, por ejemplo:

- El tipo de suelo y sus variaciones estacionales
- Los riesgos de corrosión
- El peligro de averías mecánicas
- Los reglamentos vigentes
- Las necesidades del equipo de telecomunicaciones utilizado
- Los precios aplicados localmente y la posibilidad de disponer de materiales adecuados
- La existencia de herramientas y máquinas apropiadas, así como de mano de obra calificada.

Respecto de los materiales apropiados para la construcción de las tomas de tierra, ya se ha mencionado características de dos tipos de electrodos especiales: los electrodos activos y los electrodos de grafito rígido. Con respecto a los conductores de la toma de tierras tradicionales, se puede indicar lo siguiente:

En gran número de suelos, el zinc tiende a recubrirse de una película que lo protege contra la corrosión. En cierto modo, este material puede asegurar también la protección catódica del cobre, el plomo, el estaño y el acero. Por ello, el acero galvanizado puede servir perfectamente para la construcción de electrodos de puesta a tierra si la capa de zinc es suficientemente gruesa. Se recomienda generalmente la aplicación de una capa de 70 μm como mínimo, pero si el suelo es corrosivo se recomienda aplicar una capa de por lo menos 100 μm .

El cobre enterrado en el suelo resiste muy bien a la corrosión, pero la posición de este metal en la serie de potenciales electroquímicos es tal que provoca con facilidad la corrosión galvánica del aluminio, del zinc, del acero, del estaño y hasta del plomo si se establece una conexión metálica entre uno de los citados metales y un electrodo de tierra de cobre y si les separa un electrolito (tierra húmeda). A este respecto, los electrodos de acero revestidos de cobre se comportan exactamente igual que los electrodos de cobre puro. La conductividad del cobre, mucho mayor que la del acero, hace que su empleo sea especialmente indicado en el caso de conductores y de electrodos de gran longitud, a fin de que la parte de la resistencia de tierra que depende de la resistencia del electrodo sea suficientemente baja. Por desgracia, la gravedad de la corrosión galvánica posible es proporcional a la masa de cobre empleada. Como la tendencia moderna, en lo que respecta a la puesta a tierra de los edificios

de centrales, consiste en conectar todos los elementos metálicos del edificio o los que salgan de él al colector de tierra, el empleo del cobre exige prestar gran atención al problema de la corrosión.

Teniendo presente el elevado riesgo de corrosión, no se recomienda el acero sin revestimiento protector ni el aluminio para los electrodos de tierra.

5.2.1 Tipos de electrodos

Se acepta el uso de las barras de hormigón armado de zapatas y vigas de fundación de edificios como electrodos de tierra, siempre que la longitud total de estas barras no sea inferior a 15 m, su profundidad de enterramiento no sea inferior a 0,75 m, y su diámetro no sea inferior a 10 mm. La longitud requerida puede obtenerse con una o más barras. Las uniones entre las barras embutidas en el hormigón y entre éstas y su conexión al exterior se harán mediante soldaduras de alto punto de fusión.

Otros tipos de electrodos de tierra posibles de utilizar serán los siguientes:

- Electrodos de cable o de cinta enterrados horizontalmente. En el caso de corrientes fuertes si se utiliza cintas de cobre, deberán tener una sección mínima de 75 mm² y un espesor mínimo de 3 mm; si son de fierro galvanizado, la sección no deberá ser inferior a 125 mm² ni el espesor menor a 5 mm.
- Electrodos de barra, formados por barras redondas, tubos o perfiles metálicos enterrados en forma vertical. Si para obtener la resistencia de puesta a tierra exigida es necesario enterrar más de una barra, la distancia entre ellas deberá ser como mínimo el doble del largo de cada una. En el caso de corrientes fuertes, los tubos o barras deberán tener un diámetro exterior de 15 mm por lo menos y deberán enterrarse verticalmente en una longitud no inferior a 2 m.
- Electrodos de plancha, formados por planchas metálicas corrugadas o lisas, continuas o perforadas, enterradas en el suelo en forma vertical. Las dimensiones mínimas recomendadas para estas planchas son de 0,5 m x 1 m y 4 mm de espesor. Si es necesario colocar varias planchas para obtener la resistencia de puesta a tierra exigida, la distancia mínima entre ellas será de 3 m.

Se podrá usar también como electrodo de tierra un conductor de cobre desnudo con una sección mínima de 16 mm² y de una longitud no inferior a 20 m, colocado a lo largo de los cimientos de una construcción y cubierto por el hormigón de éstos. El conductor será colocado en la parte más baja del cimiento y deberá estar cubierto por un mínimo de 5 cm de hormigón. Si es de fierro galvanizado, la sección no deberá ser inferior a 25 mm².

5.2.2 Electrodo especiales

a) Electrodoos activos

Un nuevo tipo de barra de puesta a tierra eléctrica se ha diseñado para usar la humedad del aire como un medio para proporcionar rápida pero permanente mejoramiento en la conductividad de la interfase eléctrica entre su área superficial y el terreno que lo circunda. En operación, el aire es bombeado por efectos de cambios de presión atmosférica en el cuerpo hueco tubular de la barra a través de perforaciones cerca de su extremo superior. La humedad del aire se extrae por condensación y gotea hacia una cama de sales metálicas granuladas. Una muy pequeña cantidad de la sal se disuelve para formar una solución electrolítica que se acumula en un receptáculo en la base del cuerpo tubular de la barra.

Con el tiempo, el exceso de solución electrolítica es expulsada a través de perforaciones cerca de la base del cuerpo tubular por el mismo fenómeno de cambio de presión atmosférica. Este exceso de solución, derramándose al terreno a una tasa de 7 a 8 gotas por día, establece "raíces electrolíticas" que proporcionan una gran reducción en la resistencia eléctrica entre la barra y el terreno. La naturaleza de esta acción de "raíz electrolítica" es tal que dentro de un tiempo relativamente corto (2 a 4 meses) la resistencia se reduce a una fracción de su valor inicial .

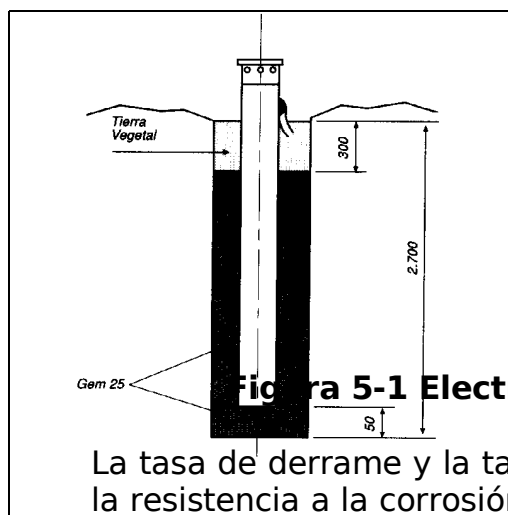
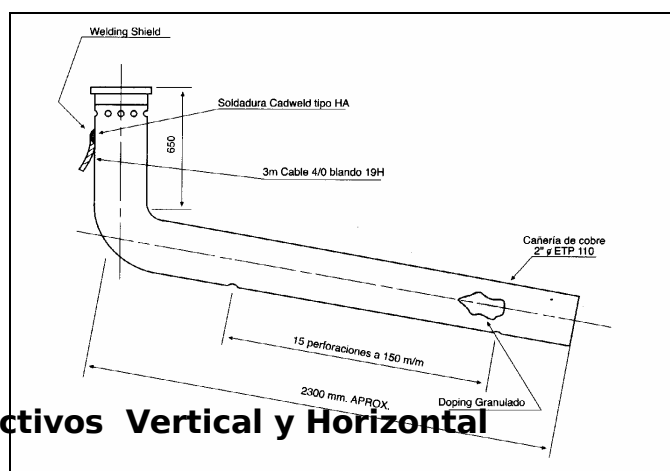


Figura 5-1 Electrodoos activos Vertical y Horizontal



La tasa de derrame y la tasa de disolución de sal son ambas muy bajas y la resistencia a la corrosión del casco tubular de la barra es muy alta; los fabricantes han estimado que la barra debiera ser capaz de mantener baja resistencia a través de una vida útil de al menos medio siglo.

Las barras se fabrican de cobre en tubos de longitud de 8 a 20 pies (2,44 a 6,20 m), llenos con sal metálica. Posteriormente se colocan en terreno gorros atornillados y la provisión para conexión eléctrica se realiza instalando una conexión con placa de presión y golillas de presión en un

extremo de cada tubo. Se realizan cuatro perforaciones a aproximadamente 2 pulgadas (5,1 cm) desde la base del tubo para permitir derrame de la solución electrolítica.

En áreas que tienen delgadas capas de suelo sobre un subsuelo de roca, se diseñan barras para ser enterradas horizontalmente en zanjas y tienen forma de L. La pierna horizontal de 20 a 30 pies (6,20 a 9,15) de esta forma L es agujereada a intervalos a lo largo de su longitud para promover la acción requerida de crecimiento de raíces electrolíticas.

Durante la instalación de las barras, para saturar la tierra en torno al tubo se usa una solución de sal. Esta saturación establece un enlace electrolítico inicial entre la barra y el terreno circundante y proporciona una solución iniciadora para la acción de "raíz electrolítica" de largo tiempo.

Según un proveedor, el sistema es libre de mantenimiento o regado y con una vida útil de 25 años. La resistencia efectiva a tierra promedio es 5 Ohms o menos en condiciones de suelo normales. Se recomienda medidas periódicas. Existen tipos recomendados para estaciones de potencia, torres de microondas y comunicaciones. Útil en áreas donde las instalaciones son especialmente vulnerables al rayo y otros apropiados para terrenos con subsuelo rocoso. Los factores de reducción indicados por fabricantes van de 3 a 10 y el tiempo para alcanzar valor final se estima en 4 meses

b) Electrodo de grafito rígido

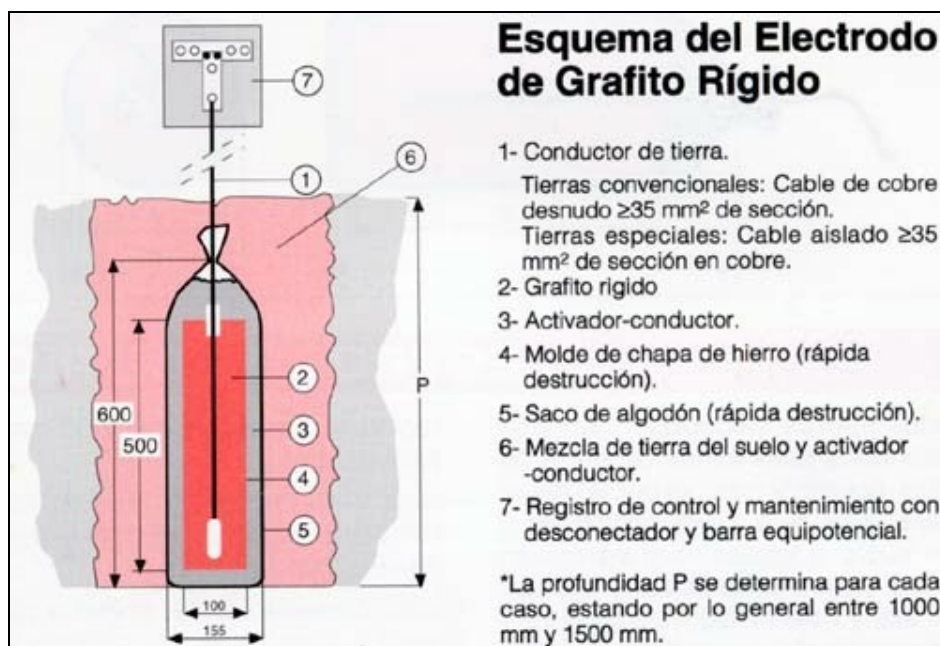


Figura 5-2 Electrodo de grafito rígido

El electrodo está compuesto enteramente por grafito, encamisado

mediante un tubo perforado protector de acero, y recubierto exteriormente por un activador-conductor con alto contenido en carbono para mejorar la resistividad del terreno. La incorporación de una fina camisa perforada de acero, el recubrimiento de activador conductor a modo de ánodo y su baja densidad definen su fácil manejo, transporte e instalación, a pesar de que sus características mecánicas indican una enorme fragilidad.

La envoltura de activador conductor con un contenido importante en grafito y en sales minerales, actúan mineralizando y disminuyendo la resistividad propia del suelo adyacente y aumentando el radio equivalente de dicha toma de tierra. En suelos de alta resistividad es aconsejable añadir activador conductor mezclándolo con la tierra de relleno, y no será necesario realizar ningún tipo de mantenimiento (regar o mineralizar periódicamente). La presencia de la protección de acero, al igual que el saco contenedor de todo el conjunto, no altera el correcto funcionamiento del electrodo, ya que en cuestión de unos meses ambos se han desintegrado.

Como está constituido enteramente por grafito, no es afectado intensamente por la corrosión a diferencia de lo que ocurre con los metales. Su vida útil es en principio ilimitada en comparación con los sistemas tradicionales. El único factor que puede degradar estos electrodos, radica en la erosión por filtración de agua, y en este sentido, se ha colocado una camisa metálica protectora y aumentado su diámetro. El electrodo de grafito rígido solo puede ser degradado por el efecto de una erosión por corriente de agua, y por tanto solo será recomendable humedecer inicialmente la puesta a tierra con el fin de acelerar la compactación e intimación de este en el suelo.

La presencia de una porosidad media no conlleva una disminución de las ventajas de este electrodo para sistemas de puesta a tierra, ya que solo le resultaría perjudicial en ambiente sumergido.

Existe un aumento de la resistencia inicial en el electrodo de grafito rígido producto de la lenta compactación e intimación en el suelo, así como por el efecto pantalla que pueden generar la protección de acero y el saco contenedor, manteniéndose transcurridos unos meses, mucho más estable que cualquier otro de los sistemas de toma de tierra. Para su instalación solo es necesario una perforación de 200 x 1500 mm de profundidad

Por estas características, el electrodo de grafito rígido es atractivo para puestas a tierra pequeñas y medianas, ya que garantizan su larga existencia y un rendimiento más que aceptable.

5.3 Dimensionamiento de los conductores

La dimensión de los conductores de los sistemas de servicio debe

calcularse conforme al valor de la corriente de servicio que circule por ellos. La norma IEEE Std. 80 establece las siguientes expresiones alternativas para especificar el calibre de un conductor según el material y la corriente que circula:

$$A_{mm^2} = I \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}}$$

$$A_{kcmil} = I \frac{197.4}{\sqrt{\left(\frac{TCAP}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}}$$

donde:

I :	Valor efectivo de la corriente, en kilo Ampères
Amm2 :	sección transversal del conductor, en mm2
Akcmil :	sección transversal del conductor, en kcmils (kcmils = mm2 x 1,974)
Tm :	máxima temperatura permitida, en °C
Ta :	temperatura ambiente, en °C
αr :	coeficiente térmico de resistividad, en 1/°C
ρr :	resistividad del conductor de tierra en micro Ohm-cm
K0 :	de acuerdo a tabla siguiente
TCAP :	capacidad térmica por unidad de volumen, de la tabla siguiente
tc :	tiempo de duración de la corriente, en segundos

Tabla 5.1 Constantes de los materiales (IEEE Std 80)

Description	Material conductivity (%)	α_r factor at 20 °C (1/°C)	K_o at 0 °C (0 °C)	Fusing ^a temperature T_m (°C)	ρ_r 20 °C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP thermal capacity [J/(cm ³ ·°C)]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod ^b	20.0	0.003 78	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	61.0	0.004 03	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 5005 alloy	53.5	0.003 53	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.003 47	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.003 60	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.001 60	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod ^c	9.8	0.001 60	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.03

^aFrom ASTM standards.

^bCopper-clad steel rods based on 0.254 mm (0.010 in) copper thickness.

^cStainless-clad steel rod based on 0.508 mm (0.020 in) No. 304 stainless steel thickness over No. 1020 steel core.

Normalmente, sin embargo, razones mecánicas determinan una dimensión mayor.

5.4 Conexiones.

Los electrodos de tierra tienen que ser conectados entre sí de alguna manera y es normal que sea vía cobre desnudo si es posible, ya que esto ayudará a reducir el valor de impedancia global. Las conexiones entre los diferentes componentes deben ser mecánicamente robustas, tener buena resistencia a la corrosión y baja resistividad eléctrica. Es prudente evitar uniones y conexiones innecesarias. Debe considerarse el valor de corriente de falla y la duración de la falla que se espera que soporte el sistema de tierra. Varios estándares indican especificaciones para los materiales que son mínimos aceptables, por ejemplo, establecen que las coplas para barras de cobre necesitan un contenido mínimo de cobre de 80%.

Las uniones entre el conductor de puesta a tierra y el electrodo de puesta a tierra, o las uniones entre los conductores que formen el electrodo de tierra pueden efectuarse mediante abrazaderas, prensas de unión o soldaduras de alto punto de fusión. No se acepta el empleo de soldadura de plomo - estaño como único método de unión en puestas a tierra; sin embargo, se le podrá usar como complemento al uso de abrazaderas o prensas de unión. Los materiales empleados en estas uniones y su forma de ejecución serán resistentes a la corrosión. A continuación se explican en más detalle los métodos de unión que se emplean, incluyendo métodos mecánicos, bronceados, soldadura exotérmica y soldados por fusión.

5.4.3 Conexiones mecánicas.

Los conectores deben satisfacer los requerimientos de los estándares aplicables. Son factores importantes el diseño, tamaño y material usado - particularmente ya que tales conectores pueden permanecer invisibles en el terreno por cierto número de años, antes de que sean solicitados para operar. Es esencial una conexión eléctrica de baja resistencia, especialmente en sistemas de electrodos del tipo radial

Cuando se apernan entre sí cintas de cobre, debe tenerse cuidado con el tamaño de las perforaciones efectuadas para acomodar el perno. Si son demasiado grandes, la capacidad de transporte de corriente de la cinta será perjudicada. Por esta razón, los estándares y reglamentos de práctica normalmente limitan el diámetro de la perforación a un tercio del ancho de la cinta o menos.

Cuando se apernan metales diferentes (por ejemplo cintas de cobre y aluminio), las superficies deben ser minuciosamente limpiadas y protegidas por un inhibidor de óxido. Una vez efectuada la conexión, el exterior debe ser cubierto por pintura bituminosa u algún otro medio para proteger contra el ingreso de humedad. Cuando se une cobre y aluminio, el cobre primero debe ser estañado. Una unión apernada de este tipo es actualmente el método recomendado preferentemente en los estándares para conectar metales diferentes, en el caso de instalaciones exteriores y en subestaciones eléctricas. Estas conexiones deben estar a una mínima distancia sobre tierra y no pueden ser enterradas.

Para unir distintos tipo de conductores, por ejemplo barras de tierra a cinta o cable, se dispone de abrazaderas apropiadas. Estas deben tener un alto contenido de cobre - no debe usarse bandas metálicas.

En alguna oportunidad se usó uniones de tipo estaño y remachado. La cinta de cobre se perforaba, luego era estañada y remachada. Sin embargo, los remaches algunas veces se rompen y sueltan debido a vibración, etc. Este método de unión es claramente no recomendado para tratar los altos valores de corriente de falla encontrados ahora.

5.4.2 Conexión bronceada

La conexión bronceada se aplica ampliamente al cobre y aleaciones de cobre. Este método tiene la ventaja de proporcionar una baja resistencia de unión la cual no se corroe. Actualmente es el método preferido descrito por los estándares para conectar cintas de cobre en el interior de subestaciones. Sin embargo es esencial que el bronceado sea efectivo. Puede ser difícil hacer una buena unión en terreno, particularmente donde están involucradas grandes áreas de sección transversal. Son esenciales las superficies planas limpias pues los materiales de bronceado no son generalmente libres de fluir como la soldadura. Existe así la posibilidad de conexiones adecuadas solo en los puntos de contacto, pero con

vacíos importantes que quedan sin llenar. Para este trabajo es esencial una buena fuente de calor, particularmente para conectores grandes.

5.4.3 Unión exotérmica

Estas uniones se realizan mediante un molde de grafito que se diseña para ajustar el tipo específico de unión y el tamaño de los conductores. Usando una pistola con pedernal se enciende una mezcla de polvo de aluminio y de óxido de cobre y la reacción que se crea forma una unión de cobre virtualmente puro en torno a los conductores. La reacción de alta temperatura se produce en el interior del molde de grafito. Si se ocupa y mantiene adecuadamente, cada molde puede usarse para realizar entre 50 y 70 uniones. Este tipo de unión asegura los siguientes beneficios:

- Proporciona una unión permanente, de baja resistencia eléctrica y resistente a la corrosión.
- La técnica empleada no requiere adiestramiento, relativamente.
- Puede operar a alta temperatura, permitiendo eventualmente reducir el calibre del conductor.

Este tipo de unión actualmente no está permitida para conectar cobre y aluminio en subestaciones. Los metales que pueden conectarse son acero inoxidable, bronce, cobre, acero con recubierta de cobre, acero galvanizado, bronce y riel de acero. Hay algunos aspectos de seguridad involucrados con este tipo de unión, pero la técnica se ha desarrollado rápidamente para controlarlos - por ejemplo, reduciendo la emisión de gas.

5.4.4 Conexiones soldadas.

El cobre puede unirse por soldadura de bronce o soldadura al arco en presencia de gas.

La técnica de unión por soldadura de bronce es efectiva y de bajo costo, empleada primariamente para realizar uniones en terreno (por ejemplo en trabajos con tuberías de cobre). En esta técnica clásica, se usa bronce como metal de relleno para formar un enlace superficial entre las partes de cobre. La técnica emplea alta temperatura y un material de relleno que es el que más se ajusta al cobre. A pesar de que la soldadura de bronce puede usarse para conectar cobre a metales ferrosos, esto normalmente no se cumple para puestas a tierra.

Cuando necesita unirse componentes de cobre de mayor medida, entonces se usa soldadura al acero en ambiente gaseoso. Un arco eléctrico proporciona el calor, mientras que el área en torno al electrodo y la soldadura es envuelta por un gas tal como argón, helio o nitrógeno. Esto reduce la cantidad de oxidación que toma lugar durante el proceso de soldadura. El nitrógeno es ampliamente usado como el “gas inerte” cuando al soldar cobre. Se requieren materiales de relleno especialmente desarrollados, que son reconocidos por su buen comportamiento al soldar cobre.

El aluminio puede ser soldado vía arco de gas inerte de tungsteno o arco de gas inerte de metal. La soldadura en frío a presión se usa algunas veces para unión entre aluminio.

5.4.5 Capacidad de transporte de corriente de falla.

El tipo de unión puede influir en el tamaño del conductor usado debido a las diferentes temperaturas máximas permisibles para las distintas uniones. Por ejemplo, según la norma británica BS 7430 1991 Code of Practice for Earthing, si considerásemos una corriente de falla de 25 kA y una duración de 1 segundo, se requeriría los siguientes calibres de conductores según cada tipo de unión :

Conexión	Apernada	Bronceada	Soldada
Temp. Máxima	250°C	450°C	700°C
Calibre Conductor	152 mm ²	117 mm ²	101 mm ²

Claramente el método de unión empleado puede permitir reducir costos mediante el uso de conductores de menor sección. Note, sin embargo, que la reglamentación adoptada debe ser revisada en cuanto a que pueden ser citados diferentes valores de la temperatura máxima permisible.

5.5 Sistema de protección contra descarga atmosférica

Con el propósito de reducir el riesgo de daño provocado por una descarga atmosférica, debe especificarse un sistema de protección, el cual está

constituido básicamente por un especial sistema de puesta a tierra.

El objetivo de un sistema de protección contra sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, es procurar que las corrientes originadas por la descarga se distribuyan uniformemente entre todos los elementos conductores que integran la red de instalación a tierra, siendo la intensidad de cada rama lo más pequeña posible.

Los equipos modernos que utilizan elementos semiconductores son más sensibles por la fragilidad de los componentes y por las distancias reducidas entre las partes conductoras, siendo vulnerables a sobretensiones incluso de amplitud relativamente baja, por lo que puede necesitarse protección adicional en el propio equipo. Es así como el sistema de protección completo queda conformado por un sistema de puesta a tierra, complementado con el empleo de elementos descargadores de tensión, estratégicamente ubicados. El sistema de puesta a tierra recomendado incluye :

A) Un anillo colector de tierra exterior, formado por un conductor de cobre desnudo de diámetro 38 mm² (según una recomendación), enterrado rodeando el perímetro del recinto, al cual se pueden incorporar barras verticales de puesta a tierra tradicionales y extensiones radiales horizontales para reducir el valor de resistencia de puesta a tierra global. Las barras son útiles exclusivamente cuando a través de ellas se logra alcanzar un subsuelo de menor resistividad. Respecto de los conductores radiales, en suelos de baja resistividad la inductancia provoca una rápida caída de tensión a lo largo del electrodo radial, de modo que sólo la primera parte del electrodo, próxima al punto de impacto, contribuye efectivamente a la disipación de corriente en el suelo. La longitud efectiva para disipar corrientes de rayo es del orden de 5 metros para resistividades de 3 [Ω -m] y del orden de 20 metros para resistividades de 300 [Ω -m]. Longitudes superiores a éstas no mejoran sustancialmente el comportamiento del electrodo.

B) Un anillo colector de tierra interior, formado por un conductor no enterrado, que rodea internamente el recinto (sala de alimentación y repetidores).

Para reducir la aparición de tensiones peligrosas entre los elementos metálicos de la estructura, así como entre éstos y los equipos, es conveniente mantener la continuidad eléctrica de todas las partes metálicas, las cuales deben constituir una parte del sistema de protección. La reducción de tensiones se consigue en forma más eficaz estableciendo trayectos de conexión paralelos y separados. El anillo colector interior permite establecer tramos de conductor cortos y directos a los puntos de conexión a tierra de los diferentes equipos y elementos metálicos . Es preferible una distribución en estrella, con numerosas ramas, de las que se deriven las conexiones a tierra de los equipos.

La Figura 5.3 muestra la instalación de tierra recomendada y las principales conexiones.

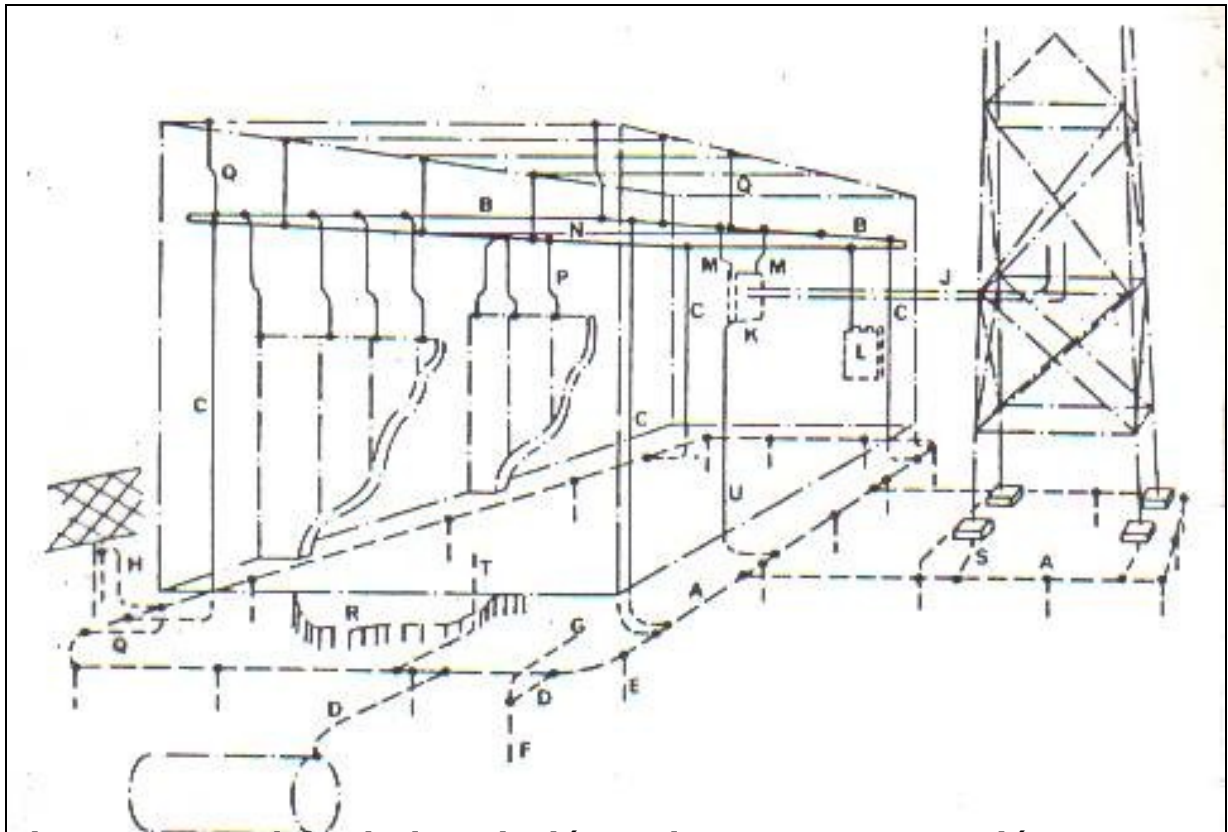


Figura 5.3 Modelo de instalación a tierra para protección contra descarga atmosférica

Diagrama de instalación de puesta a tierra para estación radiotelegráfica y principales conexiones de toma de tierra

A: colector anular exterior enterrado
B: colector anular interior
C: conexión del neutro del sistema de alimentación
D: conexión a la vaina de cables de 4 mm
E: conexión a la vaina de cables de 4 mm
F: conexión a la vaina de cables de 4 mm
G: conexión a la vaina de cables de 4 mm
H: conexión a la vaina de cables de 4 mm
I: conexión a la vaina de cables de 4 mm
J: conexión a la vaina de cables de 4 mm
K: salida de guías de onda
L: conexión a la vaina de cables de 4 mm
M: conexión a la vaina de cables de 4 mm
N: conexión a la vaina de cables de 4 mm
O: conexión a la vaina de cables de 4 mm
P: conexión a la vaina de cables de 4 mm
Q: conexión a la vaina de cables de 4 mm
R: conexión a la vaina de cables de 4 mm
S: conexión a la vaina de cables de 4 mm
T: conexión a la vaina de cables de 4 mm
U: conexión a la vaina de cables de 4 mm
V: conexión a la vaina de cables de 4 mm
W: conexión a la vaina de cables de 4 mm
X: conexión a la vaina de cables de 4 mm
Y: conexión a la vaina de cables de 4 mm
Z: conexión a la vaina de cables de 4 mm

Al colector de tierra interno se recomienda conectar el conjunto de guía-ondas, cubiertas metálicas de cables coaxiales y de energía en el lugar que penetran al recinto. Para las líneas de comunicaciones, guía-ondas y cables que ingresan en el recinto de la subestación, conviene conectar entre sí el blindaje de los cables aéreos, su cable soporte y la fijación al poste de entrada y conectar todo a tierra en dicho poste. La fijación del cable soporte a la estructura y el blindaje de los cables pueden conectarse a la puesta a tierra anular exterior. Dentro del recinto, el blindaje de los cables, la extensión del soporte y el terminal de entrada del cable pueden conectarse al colector de anillo interior. El blindaje de cables enterrados puede conectarse tanto a la toma de tierra anular exterior como al colector de anillo interior.

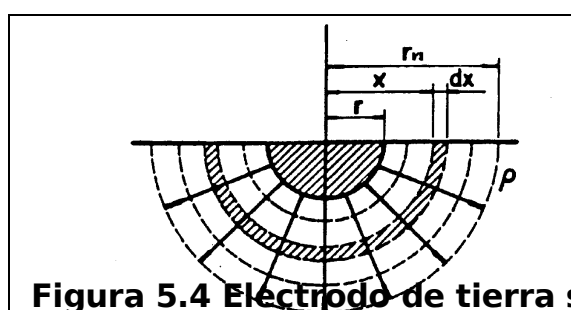
En el caso de equipos instalados en la parte superior de la torre, puede

ser necesario instalar una pantalla tipo chimenea para los cables que bajan por la torre. Las antenas metálicas deben conectarse a la estructura metálica del soporte para impedir la formación de arcos.

Las guía-ondas y los conductores externos de cables coaxiales deben conectarse a la torre en la parte superior e inferior de ésta. En este último punto, la conexión con el electrodo de tierra anular de la torre debe efectuarse en la forma más recta y directa (corta) posible, en una de las bases de apoyo de la torre. Es favorable la inclusión de conexiones intermedias adicionales.

5.6 Mejoramiento de la resistividad del terreno.

Con el propósito de visualizar en primer lugar teóricamente cual es efecto de modificar la resistividad del terreno inmediatamente contiguo al electrodo de tierra, consideremos el siguiente modelo, constituido por un electrodo semi-esférico, el cual se muestra en la Figura 5.4, donde r es el radio del electrodo, x es el diámetro interior de la concavidad semi-esférica, dx es el espesor de la concavidad y ρ es la resistividad del suelo (constante). La resistencia incremental, dR , del suelo que está rodeado por las dos superficies equipotenciales, (superficies punteadas semi-esféricas) está dada por la expresión indicada al lado.



$$dR = \frac{\rho dx}{2 \pi x^2}$$

Figura 5.4 Electrodo de tierra semie

----- SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES

La resistencia total del suelo que está comprendido entre la superficie del electrodo de radio r y el radio r_n es:

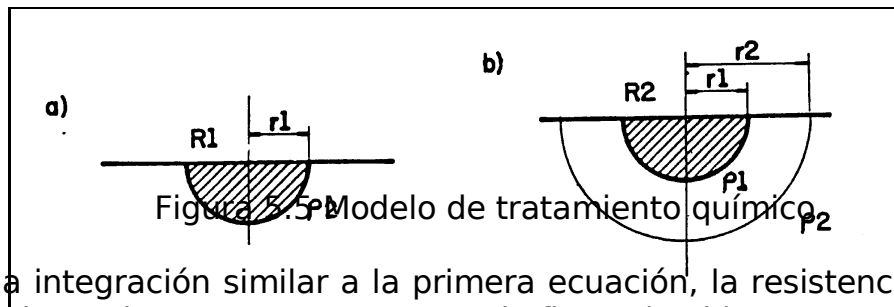
$$R = \int_r^{r_n} dR = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n} \right)$$

La resistencia para r_n infinito es :

$$R = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Esta es la denominada resistencia de tierra del electrodo semiesférico. Consideremos ahora el electrodo de tierra semi-esférico rodeado por 2

capas de suelo con diferentes resistividades ρ_1 y ρ_2 , según se muestra en la Figura 5.5



Por una integración similar a la primera ecuación, la resistencia de tierra de los electrodos que se muestran en la figura (5.2b) es:

$$R_2 = \frac{\rho_2 r_1 + (r_2 - r_1) \rho_1}{2\pi r_1 r_2}$$

En la Figura 5.5 b el terreno con resistividad ρ_1 es la porción que representa la parte correspondiente al tratamiento químico considerado.

La resistencia de tierra R_1 del electrodo no tratado, se muestra en la Figura 5.5 a y es:

$$R_1 = \frac{\rho_2}{2\pi r_1}$$

La relación entre R_2 y R_1 es:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{r_1}{r_2} + \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(1 - \frac{r_1}{r_2}\right)$$

$$\text{Si } \rho_1 \ll \rho_2 : \frac{R_2}{R_1} = \frac{r_1}{r_2}$$

y tendremos que:

$$R_2 = \frac{r_1}{r_2} R_1 = \frac{\rho_2}{2\pi r_2}$$

Por lo tanto, la resistencia de puesta a tierra puede ser reducida por la disminución de la resistividad en la zona próxima al electrodo. Esto equivale a aumentar el radio efectivo del electrodo. Los procedimientos actualmente en uso mas frecuentes para el tratamiento de terrenos, son :

a) Aporte de sales "gel"

Tratando de superar el fundamental inconveniente de la adición de sales simples, o sea su no permanencia, se han desarrollado métodos para corregir esa deficiencia. Todos ellos tienen un denominador común y consisten en inyectar o irrigar el terreno con dos o más sales en solución acuosa acompañadas de catalizadores en la proporción adecuada, que reaccionan entre si formando un precipitado en forma de "gel" estable, con una elevada conductividad eléctrica, resistentes a los ácidos del terreno, con buenas cualidades higroscópicas y lo más importante, insoluble en agua. La insolubilidad es lo que confiere al tratamiento su permanencia en el tiempo. De esta manera se consiguen notables reducciones de la resistencia a tierra que van del 25 al 80 % del valor original sin tratamiento. Las soluciones químicas más conocidas para este método son:

Aérylamida : La gel pura tiene una resistividad de aproximadamente 1 ohm-m. Las sales y catalizador utilizados son tóxicos y deben conocerse las reglas para su manejo.

Gel de silicato: Soluciones de silicato de sodio con catalizadores adecuados, forman un gel de ácido silícico de baja resistividad, alrededor de 0,23 Ohm-m. El ácido hidrocórico usado como catalizador debe ser, por supuesto, manipulado con cuidado.

Método "Sanick" : Este proceso lleva el nombre del químico sueco que lo desarrolló. Es un gel de ferrocianuro de cobre que se forma por la combinación de sulfato de cobre y ferrocianuro de sodio. La resistividad es de aproximadamente 0,2 Ohm-m. El tiempo de formación del gel es muy corto, por lo que las soluciones deben aportarse al terreno separadamente.

Ensayos de laboratorio han demostrado que tanto el hierro como el cobre se corroen en contacto con los tres "gel" mencionados. La rapidez de la corrosión no ha sido suficientemente establecida, pero en principio, se considera que no es más seria de la que puede esperarse en terrenos ácidos o alcalinos.

b) Inyección de bentonita

La bentonita es un mineral de composición compleja, básicamente arcilla, de notables características higroscópicas, buen conductor de la electricidad y que además protege de la corrosión a los electrodos ferrosos, los que por tanto no requieren zincado. El procedimiento de ejecución de puestas a tierra con inyección de bentonita, puede emplearse en cualquier tipo de terreno de características desfavorables y no solamente para el caso de altas resistividades. Puede usarse con ventaja, por ejemplo, en terrenos de baja resistividad con agua subterránea ácida muy corrosiva. Se puede usar también con electrodos

horizontales (contrapesos).

c) Inyección de resinas sintéticas

Este método hace uso del mismo concepto básico que los otros tratamientos artificiales. La diferencia con los métodos anteriores reside en el agente utilizado, que en este caso son resinas sintéticas de bajo peso molecular, de baja resistividad (del orden de 10^{-2} ohm-cm) y de larga permanencia. Este método fue desarrollado en Japón y con él se pueden obtener resistencias de solo 10 a 20 % de las que resultarían en el terreno sin tratar.

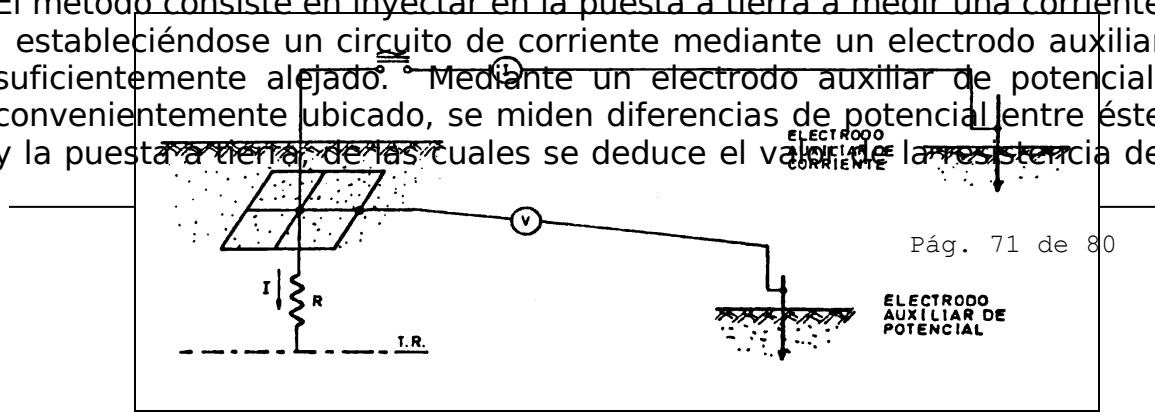
CAPITULO 6 MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

Introducción

La medición de la resistencia de una puesta a tierra permite conocer el valor real de ésta. Las circunstancias en las cuales se requiere realizar una medición de resistencia de puesta a tierra son variadas, siendo las más frecuentes:

- Verificación del proyecto de una puesta a tierra de una instalación eléctrica: subestación o estructuras de líneas de transmisión.
- Conocimiento de las características de una puesta a tierra sin antecedentes de su proyecto y diseño.
- Verificación periódica de puestas a tierra por posibles cambios de las condiciones con que fue proyectada.
- Comprobación de los métodos especiales de mejoramiento de puestas a tierra en terrenos de alta resistividad: uso de sales, bentonita, etc.

El método consiste en inyectar en la puesta a tierra a medir una corriente I estableciéndose un circuito de corriente mediante un electrodo auxiliar suficientemente alejado. Mediante un electrodo auxiliar de potencial, convenientemente ubicado, se miden diferencias de potencial entre éste y la puesta a tierra, de las cuales se deduce el valor de la resistencia de



puesta a tierra.

Figura 6.1: Método de 3 electrodos para medición de resistencia de una puesta a tierra.

Cuando se realizan mediciones con instrumentos portátiles, la corriente inyectada está limitada casi exclusivamente por la impedancia de la fuente interna. Esta corriente es normalmente de algunas pocas decenas de mili-amperes. Sin embargo, cuando se realizan mediciones inyectando corrientes elevadas en la puesta a tierra (algunas decenas de amperes), la corriente está limitada principalmente por el electrodo auxiliar de corriente. En casos de muy bajo valor de resistencia de puesta a tierra influye en alguna medida la impedancia del conductor. De ahí la necesidad de dimensionar adecuadamente el electrodo auxiliar de corriente para no tener que recurrir a voltajes aplicados que excedan lo normal y disponible.

Cuando es posible, se recomienda la utilización de otras puestas a tierra de instalaciones, como electrodo auxiliar de corriente. Si esto no es posible, deberá construirse un electrodo auxiliar de corriente formado de varios elementos metálicos enterrados, regados con abundante agua. Si se estima conveniente, se puede agregar sal al terreno circundante al electrodo de corriente.

6.1 Método clásico de medición

El método clásico de medición de resistencia de puesta a tierra consiste en ubicar el electrodo auxiliar de corriente a una distancia suficientemente alejada de la puesta a tierra a medir, tal que la resistencia mutua sea pequeña. Esto implica una zona intermedia plana de potencial, a la cual corresponde un potencial de suelo nulo $\phi = 0$. Con el método clásico, esta zona plana debe ubicarse con sucesivas mediciones de diferencia de potencial entre la puesta a tierra a medir y el electrodo auxiliar de potencial, como se indica en la Figura 6.2.

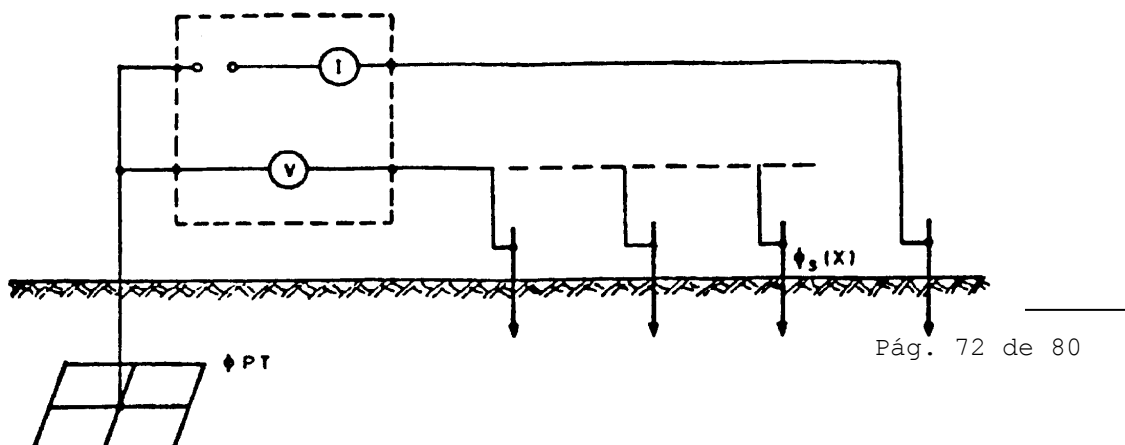


Figura 6.2: Método clásico de medición.

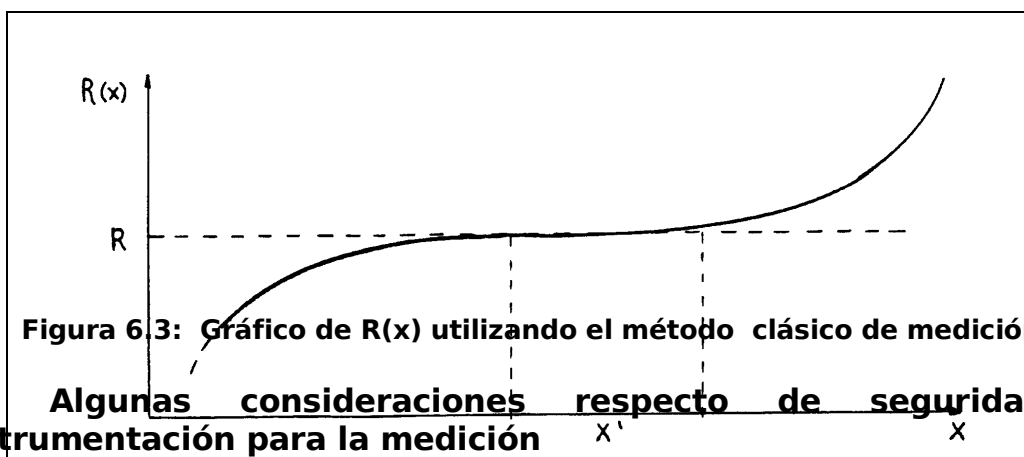
Si en la figura 6.2, $V(x)$ es el voltaje medido para una ubicación del electrodo de potencial a una distancia x del centro eléctrico de la puesta a tierra a medir, entonces se puede definir una resistencia $R(x)$:

$$R(x) = \frac{V(x)}{I_0} = \frac{\phi_{PT} - \phi_S(x)}{I_0}$$

En la zona aproximadamente plana del gráfico de $\phi_S(x)$ se tiene que $\phi_S(x') = 0$. Por lo tanto:

$$R(x') = \frac{\phi_{PT} - \phi_0}{I_0} = \frac{\phi_{PT} - \phi_0}{I_0} = R$$

La curva de $R(x)$ tiene la forma conocida que se indica en la Figura 6.3.



6.2 Algunas consideraciones respecto de seguridad e instrumentación para la medición

Para sistemas de electrodos de pequeño y mediano tamaño, la medida del valor óhmico de un electrodo enterrado se realiza con un probador de resistencia a tierra normal compuesto de cuatro terminales. Este puede

ser el mismo instrumento usado para medida de resistencia de terreno. Hay dos terminales de potencial, P1 y P2 y dos terminales de corriente, C1 y C2. Como parte del paquete, el fabricante normalmente proporciona cuatro estacas de tierra y algunos rollos de cable. Estos instrumentos normalmente solo miden el valor resistivo de la impedancia del electrodo.

Para sistemas de electrodos de gran área, se requiere normalmente un equipo más sofisticado. Este tiene que medir impedancias muy pequeñas y tendrá que pasar más corriente que el instrumento normal.

El procedimiento de prueba implica traer una conexión desde el electrodo de corriente remoto, que esta a potencial cero (o aproximadamente), al área inmediatamente adyacente al electrodo que se medirá. Mientras se desarrolla la prueba, podría ocurrir una falla a tierra que involucre al equipo conectado al electrodo principal y el potencial del electrodo y en el entorno del electrodo se elevaría. Para electrodos pequeños, este hecho puede que no introduzca una dificultad importante. Sin embargo, en sistemas con grandes electrodos o aquellos asociados con redes de potencia, la elevación de voltaje puede ser importante. Dependiendo del estado de la prueba en ese momento, una o más de las personas que están participando puede ser sometida a una diferencia de potencial posiblemente peligrosa, por ejemplo entre manos. Para asegurar que esto no suceda, se requiere un procedimiento de seguridad rigurosamente organizado, que incluya los siguientes elementos:

- Una persona a cargo del trabajo.
- Comunicación entre todas las personas que participan en la prueba, vía radio o teléfono portátil.
- Uso de guantes de goma y calzado adecuado.
- Uso de doble interruptor con aislación de voltaje apropiada a través del cual se conectan los cables al instrumento.
- Uso de una placa metálica para asegurar una equipotencial en la posición de trabajo. La placa debiera ser lo suficientemente grande para incluir al instrumento, al interruptor y al operador durante la prueba. Debiera tener un terminal instalado, de modo que la placa pueda conectarse al electrodo.
- Suspender la prueba durante una tormenta eléctrica u otras condiciones severas de tiempo.

En relación a la calidad de la medida, dos aspectos que deben tenerse presente en toda medición de la resistencia de puesta a tierra son:

- Presencia de corrientes y voltajes residuales en la zona de medición.
- Posibles acoplamientos entre los circuitos de corriente y de potencial o entre éstos y otros circuitos cercanos

Estos aspectos determinan en gran medida el tipo de instrumentación a emplear y los procedimientos a seguir en la medición. Existen básicamente dos alternativas de instrumentación para la medición de una puesta a tierra:

- Utilizar instrumentos portátiles que inyectan pequeñas corrientes a través de la puesta a tierra.
- Inyectar corrientes elevadas (1 a 10 A) a través de la puesta a tierra a medir. Para ello se utiliza normalmente la alimentación de servicios auxiliares existente en la instalación (220/380 V). Las medidas se realizan con los instrumentos tradicionales: voltímetro y amperímetro.

La primera alternativa tiene la ventaja de una mayor simplicidad y rapidez en la medición. Sin embargo, lo reducido de las corrientes inyectadas y, por lo tanto, lo reducido de los voltajes medidos, hacen que estas mediciones sean muy afectadas por los voltajes residuales que puedan existir en las zonas de medición, sobre todo en el caso de instalaciones energizadas. Además, pueden producirse perturbaciones por inducción de circuitos de poder, lo que eventualmente puede dañar los instrumentos.

La medición con corrientes inyectadas altas, elimina o aminora el efecto de los voltajes residuales y es posible utilizar circuitos que permiten eliminar el efecto de éstos. Sin embargo, su implementación es más compleja y exige mayor tiempo de medición.

Para decidir el tipo de instrumentación a usar y las precauciones adicionales a considerar, deben tenerse presente los siguientes aspectos:

- Tamaño de la puesta a tierra que se desea medir (área abarcada).
- Orden de magnitud de la resistencia a medir.
- Presencia de voltajes residuales propios (instalación energizada) o externos.
- Acoplamiento (paralelismo) del circuito de medición con líneas de transmisión próximas.

6.3 Medición en instalaciones energizadas o con voltajes residuales externos de 50 Hz.

Normalmente en las mediciones de resistencia de puesta a tierra se observa la presencia de voltajes residuales, esto es, diferencias de potencial entre la puesta a tierra a medir y puntos del terreno circundante, sin que se haya inyectado una corriente de medición. La influencia de estos voltajes residuales en los resultados de la medición

depende de su magnitud relativa. Si alcanzan sólo un 5 a 10% del voltaje medido con corriente inyectada, su efecto puede ser despreciado en los cálculos, salvo en casos particulares de resistencias de puesta a tierra de valores pequeños. Generalmente los voltajes residuales tienen una magnitud y ángulo de fase variables en el tiempo. Esta variación se produce con mayor o menor rapidez dependiendo del origen particular del voltaje residual y de las características del sistema eléctrico asociado.

Una forma de minimizar el efecto de los voltajes residuales, utilizada por los instrumentos portátiles, es inyectar una corriente de frecuencia diferente a la frecuencia fundamental o a sus armónicas y discriminar en la medida de corriente, sólo las corrientes de dicha frecuencia.

Otra forma de minimizar el efecto de los voltajes residuales, es inyectar corrientes de medición de una magnitud tal que los voltajes medidos sean mayores que los residuales. Esto no siempre es posible, ya que la corriente inyectada está limitada normalmente por la resistencia del electrodo auxiliar de corriente y la disponibilidad de voltajes a aplicar en el circuito de corriente (normalmente 220 V). La figura 6.4 siguiente muestra un circuito de medida.

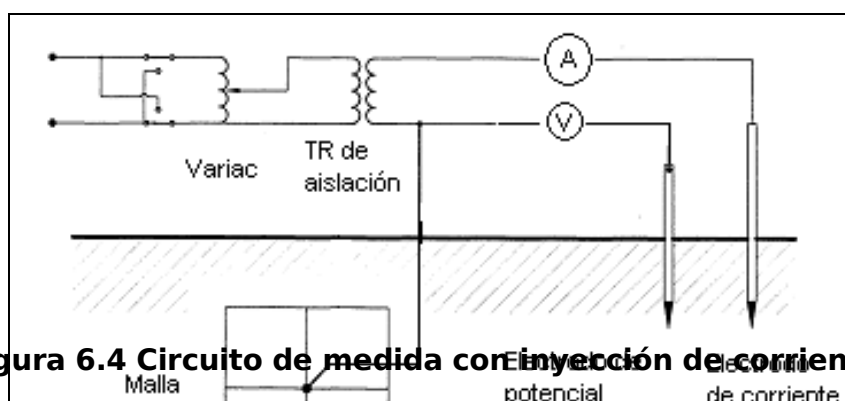


Figura 6.4 Circuito de medida con inyección de corriente

6.3.1 Medida de electrodos de pequeño y mediano tamaño.

El método usado normalmente es el método de "caída de potencial". El procedimiento recomendado es el siguiente:

- La placa metálica se ubica en la posición desde donde se dirige la prueba. El instrumento, el interruptor y los fusibles (si se consideran necesarios) deben ubicarse sobre la placa. Los terminales C1 y P1 del instrumento se conectan al electrodo en prueba y además se hace una conexión a la placa.

- La estaca de corriente normalmente debe instalarse como mínimo, considerando al menos 5 veces la dimensión mayor del sistema de electrodos que se está midiendo. Cuando se mide la resistencia de unas pocas barras de tierra, puede ser suficiente una distancia de 40 a 50 metros. La ubicación de las estacas de corriente debe ser preferentemente cruzando terrenos o campos abiertos. Si existen conductores aéreos o cables, o tuberías metálicas enterradas, la línea entre la estaca y el electrodo en prueba debe elegirse cruzando estos sistemas y no paralela a ellos.
- Si se emplea el método tradicional, la estaca de voltaje debe ubicarse aproximadamente a 2 metros de distancia de la línea entre el punto de prueba y la estaca de corriente, inicialmente a una distancia correspondiente al 61,8% de la distancia entre el punto de prueba y la estaca de corriente. (Nota: la razón para elegir la distancia de 61,8% se basa en la teoría matemática aplicada a la suposición de terreno homogéneo de resistividad uniforme).
- Si se ubica la estaca de voltaje en dirección diferente a la indicada por el método tradicional, debe ubicarse a una distancia al menos 5 veces la dimensión máxima de la malla
- Se conectan a través de los respectivos cables tanto el punto (electrodo) en prueba como los dos electrodos (de voltaje y de corriente). Con el interruptor múltiple abierto, se conectan los cables al interruptor y luego éste se conecta a los respectivos terminales P2 y C2 del instrumento.
- El operador debe pararse con ambos pies sobre la placa. Comunicando a las otras personas involucradas, el interruptor múltiple se cierra, se opera el instrumento y se toma la lectura. Luego se abre nuevamente el interruptor.
- El procedimiento se repite, desplazando la estaca de voltaje primero acercándose 2 metros hacia el electrodo en prueba y luego alejándose de éste. Si estas tres lecturas se diferencian por menos de 5%, puede aceptarse la lectura (a la distancia del 61,8% en el método tradicional, o la obtenida en la posición intermedia según otra dirección de medida) como valor representativo.
- Si las lecturas se diferencian por más de 5%, el procedimiento debe repetirse; en el caso del método tradicional, desplazando la estaca de corriente a una nueva posición, normalmente más retirada que la posición de la prueba anterior; en el caso de tomar otra dirección para la estaca de voltaje, alejándose del electrodo en prueba.

La causa más común de error en el método tradicional, se debe a colocar la estaca de corriente demasiado cerca del electrodo bajo prueba. La influencia del electrodo de tierra y de la estaca de corriente se trasladará

y la resistencia medida normalmente será un valor menor que el real. Una segunda equivocación frecuente es colocar la estaca de voltaje demasiado cerca del electrodo de prueba, lo que provoca una lectura mucho menor que el valor real. Otras fuentes de error incluyen no considerar metales enterrados que se ubican paralelos a la dirección de prueba, mantener demasiado próximos los cables de las estacas de voltaje y corriente y usar cable con aislación dañada.

6.3.2 Medida de sistemas de electrodos de gran área o en terrenos de muy alta resistividad.

El método de la caída de potencial puede usarse en sistemas de electrodos más grandes, pero como se sugiere que el electrodo de corriente se ubique a una distancia entre 6 y 8 veces la distancia diagonal del sistema de electrodos, esto normalmente no es práctico. De igual modo, cuando la malla de tierra es muy grande o tiene conexiones radiales largas, por ejemplo, hacia pantallas de cables o cable de guardia de líneas de transmisión áreas, el tamaño efectivo resultante de la malla de tierra es tan grande que la medida tradicional por caída de potencial es impracticable.

Para resolver estos problemas, se ha desarrollado varias alternativas al método de caída de potencial. Una variación de la prueba consiste en desplazar la estaca de voltaje en la misma dirección, pero más lejos que el electrodo de corriente; otra alternativa es desplazar la estaca de voltaje en 180° (o en ángulo recto) con respecto a la dirección malla - estaca de corriente.

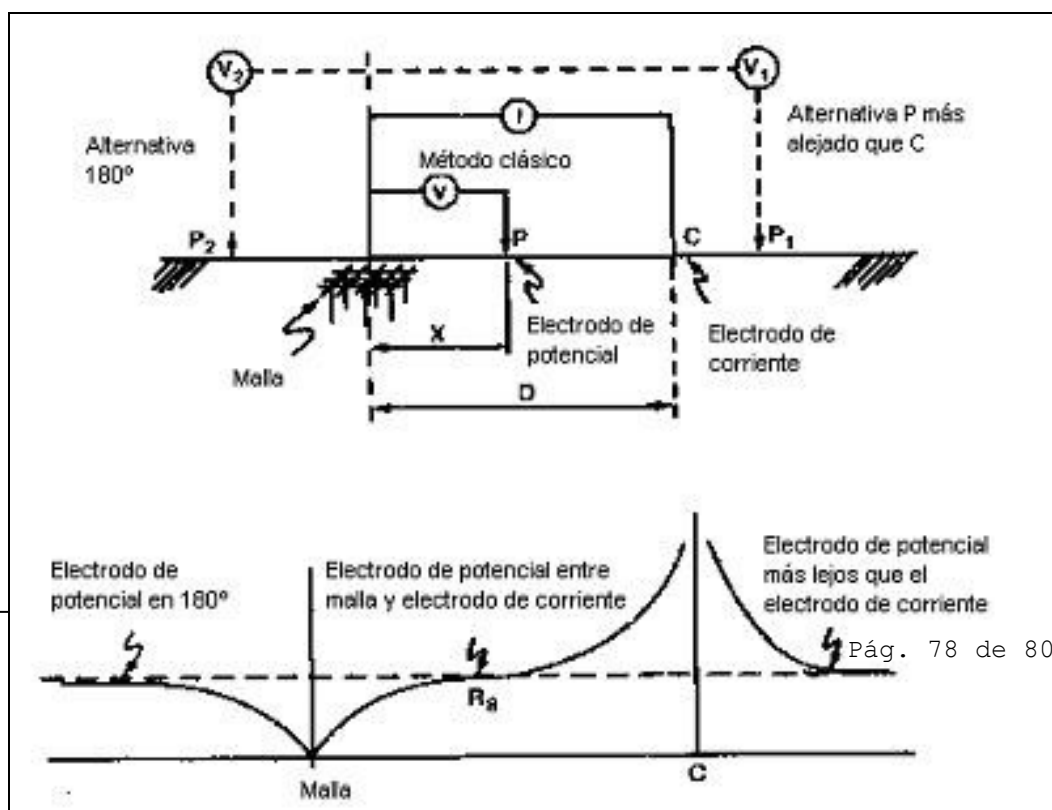


Figura 6.5 Alternativas al método clásico de caída de potencial

En cualquier caso, la distancia de la estaca de voltaje a la malla se aumenta progresivamente hasta que el valor medido apenas cambie. Este valor debe ser el valor de impedancia real de la malla. Este procedimiento puede aplicarse aún con el electrodo de corriente a distancias bastante cercanas a la malla, lo cual permite aplicarlo especialmente en terrenos de alta resistividad. Se justifica porque la zona de influencia de la malla a medir puede ser alterada en la dirección de ubicación del electrodo de corriente, pero prácticamente no se altera en un ángulo comprendido entre 90° y 270° respecto a esta dirección. Si el electrodo de voltaje se ubica en este sector, alejándolo suficientemente siempre será posible alcanzar la tierra remota y por tanto, la lectura directa de la resistencia de puesta a tierra.

Si existen cables o tuberías metálicas enterradas en la misma dirección que las rutas de los cables de prueba, producirán siempre una lectura incorrecta del valor de resistencia a tierra.

Otra alternativa como ya se ha visto, es mediante inyección de alta corriente, haciendo circular varios Amperes entre la malla y un sistema de electrodos de corriente alejado, usando un circuito de potencia.

En el caso de bajos valores de resistencia, un error común es no considerar para el cálculo de esta resistencia a tierra, la impedancia de los circuitos metálicos que interconectan los dos sistemas empleados (interconexión de bajo voltaje, circuitos de comunicación, etc.)

6.4 Medida de resistencia de puesta a tierra de un único electrodo en sistemas con múltiples puestas a tierra

La medida de la resistencia de puesta a tierra de un electrodo conectado eléctricamente con otras puestas a tierra, requiere normalmente la desconexión del electrodo a medir, ya que la medida en las condiciones normales entregará el valor de resistencia de puesta a tierra de la combinación paralelo de todas las tomas de tierra.

Sin embargo, la desconexión de una toma de tierra regularmente es difícil de realizar y aun en muchos casos impracticable, por lo que es conveniente considerar un procedimiento que permita efectuar una medida individual de resistencia de puesta a tierra.

Con varias tomas de tierras en paralelo, la resistencia del conjunto se puede colocar como:

$$\frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \dots$$

$$R_{PT} \quad R_1 \quad R_2 \quad R_3 \quad R_4$$

y la diferencia de potencial captada por el instrumento, igual para cada una de estas tomas, corresponde al producto de la resistencia de cada toma de tierra por la fracción de corriente que circula por dicha toma de tierra:

$$V(x) = R_1 I_1 = R_2 I_2 = R_3 I_3 = R_4 I_4 = \dots$$

siendo la suma de estas corrientes, la corriente total del circuito de medida:

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots$$

Por lo tanto, para determinar solo una de estas resistencias de puesta a tierra, será necesario conocer el valor de corriente que fluye por ella. Por ejemplo, para determinar la resistencia R_1 :

$$R_1 = \frac{V_0}{I_1} = R_0 \frac{I_0}{I_1}$$

En consecuencia, si es posible detectar la fracción de corriente que se deriva por la puesta a tierra a medir, puede determinarse su resistencia de puesta a tierra individual.

Existen instrumentos que disponen, como accesorio, de una tenaza de corriente con la cual se mide el valor de corriente que circula por una toma a tierra particular e internamente se efectúa la razón anterior, permitiendo una lectura directa de la resistencia de puesta a tierra de una toma individual.

Referencias

IEEE Standard 81
Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground system